

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Dynamický rozsah vstupního signálu elektronických filtrů

Dynamic Input Range of Electronic Filters

Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Kozák**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika

Téma: **Dynamický rozsah vstupního signálu elektronických filtrů**
Dynamic Input Range of Electronic Filters

Zásady pro vypracování:

Analyzujte faktory ovlivňující dynamický rozsah vstupního signálu. Na základě provedené analýzy vypracujte:

1. Kritéria pro hodnocení filtrů z hlediska dynamického rozsahu vstupního signálu.
2. Návrhové postupy pro optimalizaci zapojení filtrů s ohledem na dynamický rozsah vstupního signálu.
3. Návrhové postupy experimentálně ověřte.

Seznam doporučené odborné literatury:

DOSTÁL, Jiří. *Operační zesilovače*. Praha : SNTL, 1981. 476 s.

Vlastní literární rešerše k řešení problematice.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Tesař**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 7. května 2014

Kozák Jan
.....

Jan Kozák

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval panu ing. Zdeňkovi Tesařovi, který mne díky svým zkušenostem dovedl až k úspěšnému vypracování této bakalářské práce. Na závěr patří ještě velký dík mé rodině a přítelkyni za každodenní povzbuzování a podporu.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je popsat statické a dynamické nelineární parametry operačního zesilovače. Následně určit kritéria omezující rozkmit vstupního signálu elektronických filtrů. Tato kritéria byla aplikována na běžně používané elektronické filtry. Filtry byly kompletně navrženy dle dokumentace ke každému z nich. Správnost návrhů byla ověřena simulací programem SNAP. Výsledkem jsou hodnoty maximálních vstupních napětí ke každému filtru. V poslední části jsou všechny elektronické filtry experimentálně sestaveny.

Klíčová slova

Operační zesilovač, Elektronický filtr, Nelineární parametry

Abstract

The topic of this bachelor thesis is dynamic and static non-linear parameters of operational amplifier. Then define the criteria of limiting input range of electronic filters. This criteria was applied in an ordinary electronic filters. Electronics filters are completely designed by documentation for each of them. The correctness of my design was checked by simulating in program SNAP. The results are values of total input range for each electronics filters. In the last part was all electronics filters experimentally assembled.

Keywords

Operational amplifier, Electronic filter, Non-linear parameters

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	Význam	Jednotka
Au	Napětové zesílení signálu	Decibel [dB]
DP	Dolní propust	-
$F_n(f)$	Nejvyšší napětový přenos k danému kmitočtu	-
HP	Horní propust	-
I_{2max}	Maximální výstupní proud	Ampér [A]
KHN	Elektronický filtr Kerwin-Huelsman-Newcomb	-
OZ	Operační zesilovač	-
PP	Pásmová propust	-
Q	Činitel jakosti	-
SR	Doba přeběhu Operačního zesilovače	Volt na Sekundu [V/S]
TT	Elektronický filtr Tow-Thomas	
U_{cc}	Napájecí napětí	Volt [V]
U_{1max}	Maximální vstupní napětí	Volt [V]
U_{2max}	Maximální výstupní napětí	Volt [V]
$Y_t(f)$	Nejvyšší admitanční přenos k danému kmitočtu	Siemens [S]
+ U_0	Kladné napájecí napětí	Volt [V]
- U_0	Záporné napájecí napětí	Volt [V]
f_0	Určený kmitočet	Hertz [Hz]
f_p	Vypočítaný kmitočet	Hertz [Hz]
t	Čas	Sekunda [S]
ω_0	Úhlový kmitočet	Radián za Sekundu [rad*S ⁻¹]

Obsah

1	Úvod	9
2	Operační zesilovač	10
2.1	Obecná charakteristika	10
2.2	Statické nelineární parametry operačního zesilovače.....	11
2.3	Dynamické nelineární parametry operačního zesilovače	12
2.4	Kritéria určující velikost vstupního signálu	12
3	Návrhové postupy pro optimalizaci filtrů.....	14
3.1	Bikvald TAB-KHN v základním neinvertujícím zapojení.....	15
3.1.1	Nastavení filtru	15
3.1.2	Simulace programem SNAP.....	17
3.1.3	Aplikace kritérií určující velikost vstupního signálu.....	19
3.2	TAB-KHN v základním invertujícím zapojení	21
3.2.1	Nastavení filtru	21
3.2.2	Simulace programem SNAP.....	23
3.2.3	Aplikace kritérií určující velikost vstupního signálu.....	25
3.3	TAB-KHN v modifikovaném neinvertujícím zapojení	27
3.3.1	Nastavení filtru	27
3.3.2	Simulace programem SNAP.....	28
3.3.3	Aplikace kritérií určující velikost vstupního signálu.....	30
3.4	TAB-TT v základním invertujícím zapojení	32
3.4.1	Nastavení filtru	32
3.4.2	Simulace programem SNAP.....	33
3.4.3	Aplikace kritérií určující velikost vstupního signálu.....	35
3.5	Pásmová propust 2. řádu se 2 operačními zesilovači	37
3.5.1	Nastavení filtru	37
3.5.2	Simulace programem SNAP.....	38
3.5.3	Aplikace kritérií určující velikost vstupního signálu.....	40

3.6	Porovnání filtrů.....	42
4	Experimentální ověření	43
4.1	Bikvald TAB-KHN v základním neinvertujícím zapojení.....	44
4.2	TAB-KHN v základním invertujícím zapojení	46
4.3	TAB-KHN v modifikovaném neinvertujícím zapojení	48
4.4	TAB-TT v základním invertujícím zapojení	50
4.5	Pásmová propust 2. řádu se 2 operačními zesilovači	52
5	Závěr.....	54
	Seznam použité literatury	55
	Seznam obrázků	56
	Seznam tabulek.....	57
	Seznam příloh.....	58

1 Úvod

Cílem mé bakalářské práce je určit kritéria ovlivňující dynamický rozsah vstupního signálu elektronických filtrů. Následně tyto kritéria prakticky aplikovat na reálná zapojení a sledovat jejich dopad na zkreslení výstupního signálu.

V druhé kapitole jsem popsal statické a dynamické nelineární parametry operačního zesilovače. Dále jsem určil kritéria určující maximální velikost vstupního signálu.

V třetí kapitole jsem nejdříve vybral z běžně dostupných a používaných elektronických filtrů, nastavil jej na námi požadované parametry a upravil s ohledem na kritéria omezující velikost vstupního signálu. Správnost mého návrhu jsem nejprve ověřil simulací pomocí programu SNAP.

Ve čtvrté kapitole jsem na nepájivém poli experimentálně sestavil všechny elektronické filtry a reálně ověřil správnost mých návrhů. Simulované a naměřené hodnoty jsem porovnal. Pro názornou ukázkou projevů nelinearit elektronických filtrů jsem cíleně v experimentálním zapojení překročil maximální vstupní napětí. Nakonec jsem vybral jeden z filtrů a určil jej jako nejvhodnější elektronický filtr.

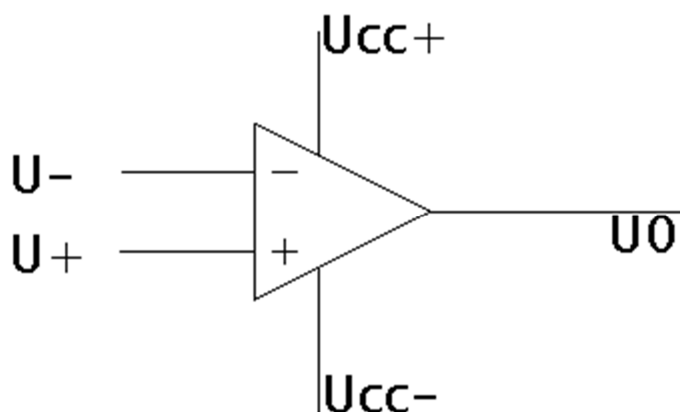
K této bakalářské práci je přiloženo jedno CD, na kterém jsou uloženy jednotlivé napěťové a admitanční průběhy vytvořené programem SNAP. Z experimentální části jsou zde uloženy výstupy z osciloskopu v nejkritičtějších kmitočtech. Rovněž jsou zde uvedeny výsledné grafy napěťových přenosů s již přepočtenými hodnotami v decibelech.

2 Operační zesilovač

2.1 Obecná charakteristika

Operační zesilovač je univerzální prvek, který byl původně určený k vytváření matematických operací na analogovém počítači. Pro své vlastnosti, přizpůsobivost a nízkou cenu ovládl operační zesilovač konstrukci analogových elektronických systémů. Operační zesilovač můžeme vymezit těmito pojmy: velké zesílení, malé vlastní rušení a schopnost stabilní činnosti v uzavřených smyčkách. Pro správnou funkci operačního zesilovače musíme přivést napájecí napětí, které je zpravidla dvojí a navzájem opačné (např. +15V a -15V). [1]

Setkáváme se se dvěma typy operačního zesilovače (OZ). Pro výpočty s OZ a simulovaná zapojení se bavíme o ideálním operačním zesilovači. Pro realizovaná zapojení se jedná o reálný operační zesilovač. Hlavní rozdíly mezi reálným a ideálním operačním zesilovačem jsou uvedeny v Tabulce 1. Schématická značka OZ je znázorněna na Obrázku 2.1.



Obrázek 2.1 Schématická značka operačního zesilovače

Tabulka 1 Srovnání ideálního a reálného OZ

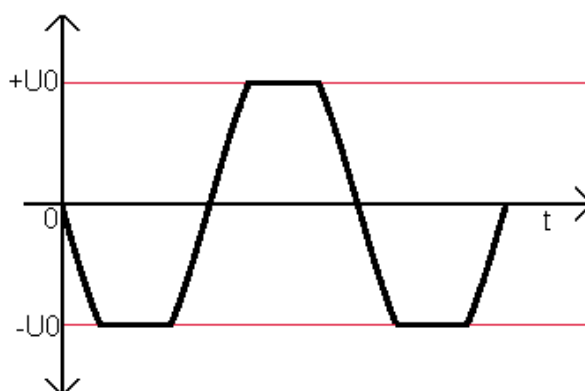
Operační zesilovač	Ideální	Reálný
Zesílení	∞ dB	< 120 dB
Vstupní odpor	$\infty \Omega$	$< 10^{12} \Omega$
Výstupní odpor	0Ω	$< 10 \Omega$

2.2 Statické nelineární parametry operačního zesilovače

Rozlišujeme dva základní typy statických nelinearit, tj. jmenovité výstupní napětí a jmenovitý výstupní proud. Velikost nelineárních parametrů jsou závislá na napájecích napětích. Katalogové hodnoty těchto parametrů jsou vždy svázány s určitým napájecím napětím a výstupní parametry jsou navíc závislé na velikosti zatížení jmenovitým rezistorem.

- Jmenovité výstupní napětí

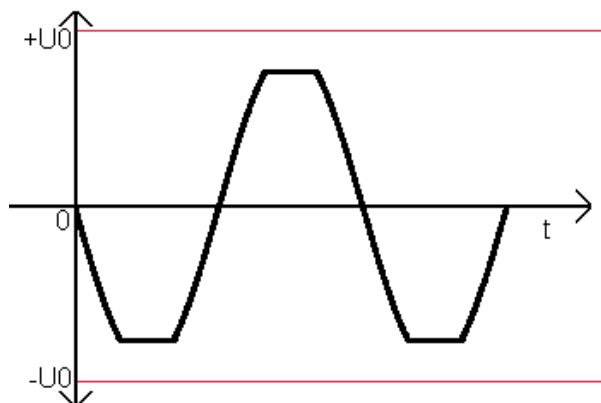
Vstupní napětí se musí pohybovat v lineární pracovní oblasti operačního zesilovače, pokud tuto podmínku nezajistíme, výsledkem bude zkreslený výstupní signál. Na Obrázku 2.2 je vidět, jak vypadá výstupní signál, pokud operační zesilovač přebudíme příliš velkým vstupním signálem. Výstupní signál je omezen na hodnotě napájecího napětí.



Obrázek 2.2 Omezení velkým vstupním signálem

- Jmenovitý výstupní proud

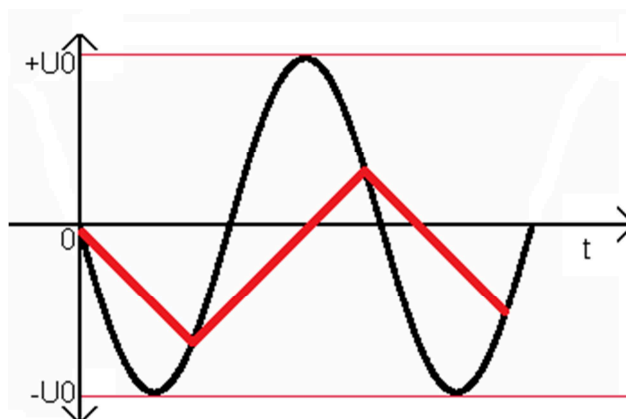
Zajistíme-li, aby operační zesilovač měl vstupní napětí takové, že bude pracovat v lineární oblasti, neznamená to však, že výstupní signál nebude nijak zkreslen. Pokud výstup přetížíme malým zatěžovacím rezistorem, bude výstup omezen na jmenovité hodnotě výstupního proudu. Příklad tohoto omezení je na Obrázku 2.3.



Obrázek 2.3 Omezení velkým výstupním proudem

2.3 Dynamické nelineární parametry operačního zesilovače

Nejdůležitější dynamický nelineární parametr je doba přeběhu. Hodnotu tohoto parametru zjistíme z katalogového listu, pokud tuto hodnotu překročíme, objeví se nám na výstupu zkreslený signál. Na Obrázku 2.4 je jasně vidět jak se tato nelinearita projevuje. Operační zesilovač nestíhá kopírovat vstupní signál a ořezává jej pilovým průběhem. Při velkém překročení této hodnoty dokonce výstupní signál nedosáhne ani maxima vstupního signálu. Toto zkreslení lze eliminovat snížením vstupního napětí signálu nebo frekvence vstupního signálu.



Obrázek 2.4 Omezení rychlosti přeběhu

2.4 Kritéria určující velikost vstupního signálu

Nutnou podmínkou, aby elektronický filtr mohl být považován za lineární je, že všechny součástky musí pracovat v lineární oblasti [5]. Kritéria, která nám určují velikost vstupního signálu, jsou odvozena z nelineárních parametrů. V první řadě tedy musíme určit kritické uzly elektronického filtru. Kritické uzly jsou všechny výstupy z aktivních prvků (v našem případě operačního zesilovače).

- Kritérium č. 1

Určit nejvyšší napěťový přenos $F_n(f)$ pro daný kmitočet v každém kritickém uzlu. Nejvyšší vstupní napětí U_1 vypočítáme jako podíl nejvyššího výstupního napětí U_2 k napěťovému přenosu $F_n(f)$, což lze vyjádřit vzorcem (2.1). Za $F_n(f)$ se dosazuje bezrozměrná jednotka (někdy také V/V, protože se jedná o poměr U_2 k U_1) nikoli však hodnota v dB, pokud máme hodnotu v dB za pomoci vzorce (2.2) jej přepočítáme do požadované bezrozměrné hodnoty. [4]

$$U_{1max} = \frac{U_{2max}}{F_n(f)} [V] \quad (2.1)$$

$$F_n(f) = 10^{\frac{Au[dB]}{20}} [V/V] \quad (2.2)$$

- **Kritérium č. 2**

Určit nejvyšší přenosovou admitanci $Y_t(f)$ pro daný kmitočet v každém kritickém uzlu. Odebíraný výstupní proud I_2 vypočítáme vynásobením přenosové admitance $Y_t(f)$ s maximálním vstupním napětím U_1 . Vyjádřeno vzorcem (2.3). [4]

$$I_2 = Y_t(f) * U_{1max} [A] \quad (2.3)$$

- **Kritérium č. 3**

Díky kritériu 1 již známe nejvyšší napěťový přenos pro určitý kmitočet. Této skutečnosti využijeme a vypočítáme si dobu přeběhu SR ze vzorce (2.4) [4].

$$SR = 2\pi * F_n(f) * U_{2max} * 10^{-6} [V/\mu S] \quad (2.4)$$

3 Návrhové postupy pro optimalizaci filtrů

Vybrali jsme 5 nejčastěji používaných zapojení a zvolili jsme tyto podmínky, které musí každý filtr splňovat. Musí se jednat o pásmovou propust, která bude mít největší napěťový přenos při kmitočtu $f_0 = 10$ kHz. Dále bude použit operační zesilovač LM348N, který je běžně k dostání. Symetrické napájecí napětí ± 12 V. Pro názornou ukázkou různých napěťových průběhů jsme všechny filtry nastavili pro činitel jakosti 1, 2, 5, 10. K operačnímu zesilovači se vážou důležité katalogové hodnoty:

- Maximální výstupní napětí 10 V (při napájecím napětí ± 12 V)
- Maximální výstupní proud 25 mA
- Doba přeběhu 0,5 V/ μ S

Pokud tyto katalogové hodnoty nepřekročíme, potom se bude operační zesilovač chovat lineárně.

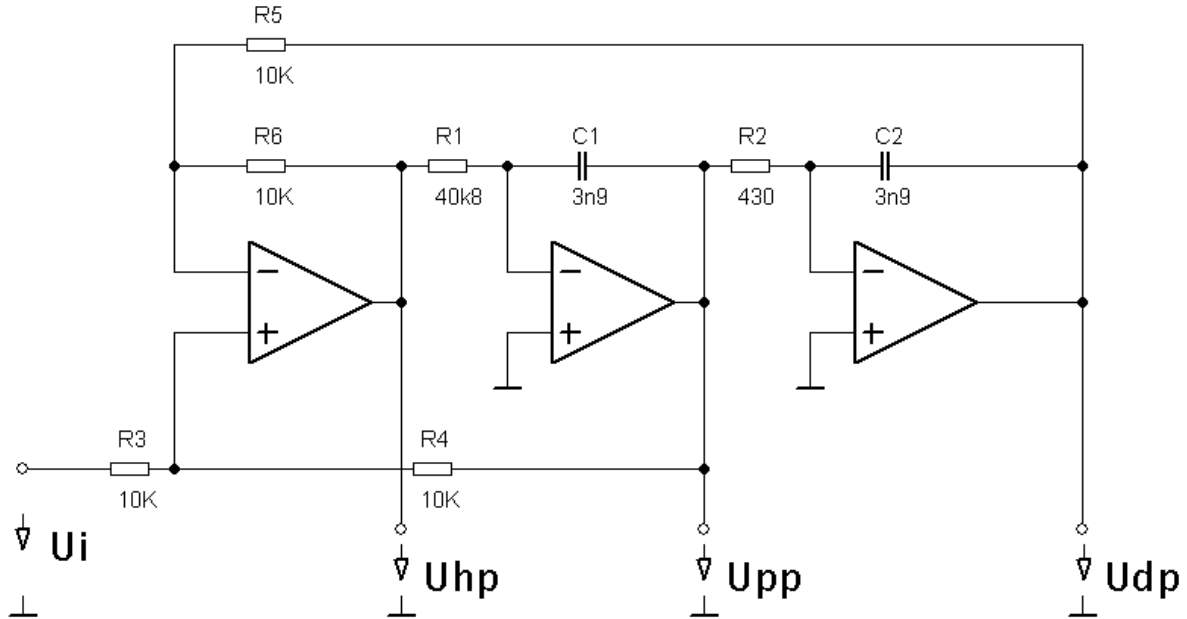
Pro lepší přehlednost je výčet požadovaných vlastností elektronického filtru uveden v Tabulce 2.

Tabulka 2 Požadované vlastnosti

Parametr	Hodnota
f_0	10 kHz
U_{cc}	± 12 V
Q	1, 2, 5, 10
OZ	LM348N
U_{2max}	10 V
I_{2max}	25 mA
SR	0,5 V/ μ S

V první řadě je třeba každý filtr nastavit na námi požadované vlastnosti, což provedeme vhodnou kombinací rezistorů a kondenzátorů. Hodnotu těchto součástek si vypočítáme ze vzorců, které jsou uvedené v dokumentaci ke každému filtru. Následně provedeme simulaci programem SNAP a zjistíme velikosti napěťových a admitančních přenosů. Z těchto přenosů jsme schopni vypočítat všechna kritéria omezující velikosti vstupního signálu a následně určit hodnotu maximálního rozkmitu vstupního signálu pro každý filtr.

3.1 Bikvald TAB-KHN v základním neinvertujícím zapojení



Obrázek 3.1 Schéma zapojení KHN neinvertující pro $Q=10$

3.1.1 Nastavení filtru

Výpočet hodnot si ukážeme na činiteli jakosti $Q = 10$, pro ostatní Q je výpočet obdobný. Z doporučení [2] získáme vzorce pro výpočet kapacit (3.1) a (3.2), dále volíme $C_1 = C_2 = C$.

$$C = \frac{3,3 \cdot 10^{-7}}{\sqrt{f_0}} = \frac{3,3 \cdot 10^{-7}}{\sqrt{10000}} = 3,3 \cdot 10^{-9} F \quad (3.1)$$

$$C_{min} = 4 \cdot 10^{-11} \cdot Q^2 = 4 \cdot 10^{-11} \cdot 10^2 = 4 \cdot 10^{-9} F \quad (3.2)$$

Vypočtená hodnota z (3.1) je nižší než doporučená minimální hodnota kapacity z (3.2), proto zvolíme z řady E12 nejbližší hodnotu doporučeného minima, což je **3,9 nF**. Tuto velikost kondenzátoru použijeme i pro ostatní činitelé jakosti, protože vyšší kapacita nijak neuškodí v zapojení a v experimentálním zapojení nebude potřeba více součástek.

Z doporučení [2] získáme i vzorce pro určení velikosti rezistorů (3.6) a (3.7). Ostatní použité rezistory volíme $R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 10 \text{ k}\Omega$. Abychom mohli určit velikost rezistorů R_1 a R_2 je třeba nejdříve určit koeficienty (3.3) a (3.4) za dodržení podmínky (3.5).

$$A_1 = 1 + \frac{R_5}{R_6} = 1 + \frac{10\,000}{10\,000} = 2 \quad (3.3)$$

$$A_2 = 1 + \frac{R_3}{R_4} = 1 + \frac{10\,000}{10\,000} = 2 \quad (3.4)$$

$$a = \frac{A_1}{A_2} = \frac{2}{2} = 1 \quad (3.5)$$

$$R_1 = \frac{Q}{2\pi * f_0 * C} * \frac{A_1 * (A_2 - 1)}{A_2} = \frac{10}{2\pi * 10\,000 * 3,9 * 10^{-9}} * \frac{2 * (2 - 1)}{2} = 40\,809\, \Omega \quad (3.6)$$

$$R_2 = \frac{1}{2\pi * f_0 * C * Q} * \frac{A_1 * (A_2 - 1)}{A_2 * (A_1 - 1)} = \frac{1}{2\pi * 10\,000 * 3,9 * 10^{-9} * 10} * \frac{2 * (2 - 1)}{2 * (2 - 1)} = 408\, \Omega \quad (3.7)$$

Pro rezistor R_1 jsem zvolil sériovou kombinaci dvou rezistorů z řady E24 **40 800 Ω** a **1 800 Ω** , pro vyšší přesnost nastavení filtru. Pro rezistor R_2 jsem vybral z řady E24 hodnotu **430 Ω** . V doporučení [2] je i vzorec pro výpočet frekvence (3.8) na základě zadaných hodnot součástek, toho využijeme pro ověření správné volby rezistorů a kondenzátorů.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{A_1 - 1}{C_1 * R_1 * C_2 * R_1}} \quad (3.8)$$

Ze vztahu (3.8) si vyvodím vztah (3.9) pro výpočet frekvence.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{A_1 - 1}{C_1 * R_1 * C_2 * R_1}} = \frac{1}{C * \sqrt{R_1 * R_2}} \Rightarrow \frac{1}{2\pi * C * \sqrt{R_1 * R_2}} \quad (3.9)$$

Následně dosadíme do vzorce (3.9).

$$f_p = \frac{1}{2\pi * 3,9 * 10^{-9} * \sqrt{40\,800 * 430}} = 9\,742\, Hz$$

Frekvence je mírně nižší než naše požadovaná, je to dáno zaokrouhlením rezistorů a kondenzátorů do řady. V Tabulce 3 je uveden výčet všech vypočtených součástek pro všechny činitelé jakosti.

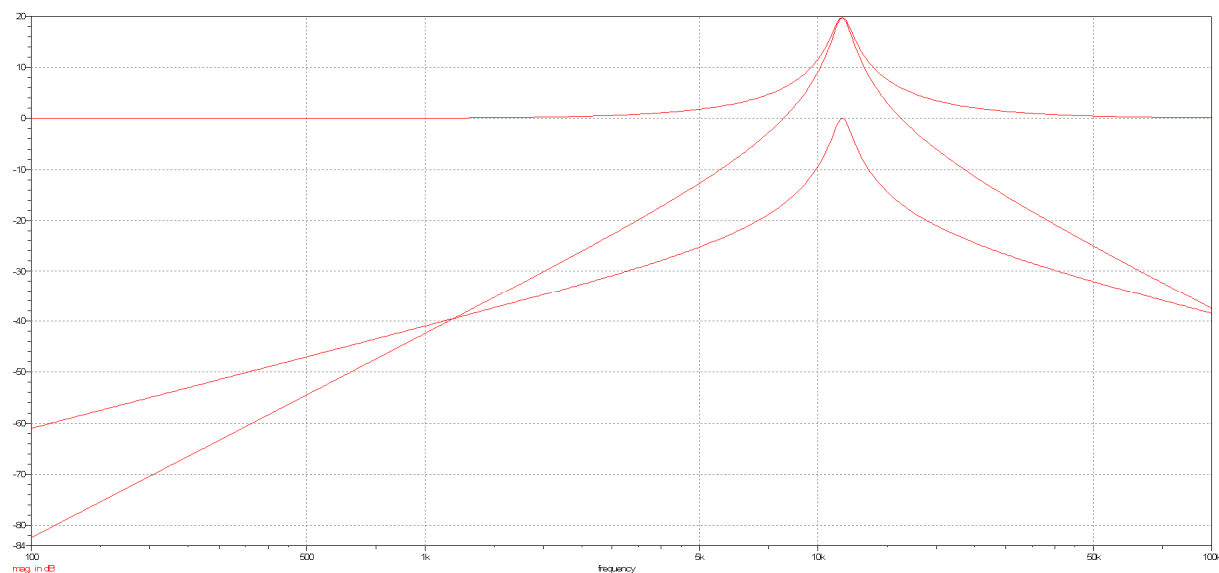
Tabulka 3 Seznam součástek KHN neinvertující pro všechna Q

	Q ₁	Q ₂	Q ₅	Q ₁₀
R ₁ [Ω]	3 900	8 200	20 000	39 000 + 1 800
R ₂ [Ω]	3 900	2 000	820	430
R ₃ [Ω]	10 000	10 000	10 000	10 000
R ₄ [Ω]	10 000	10 000	10 000	10 000
R ₅ [Ω]	10 000	10 000	10 000	10 000
R ₆ [Ω]	10 000	10 000	10 000	10 000
C ₁ [nF]	3,9	3,9	3,9	3,9
C ₂ [nF]	3,9	3,9	3,9	3,9

3.1.2 Simulace programem SNAP

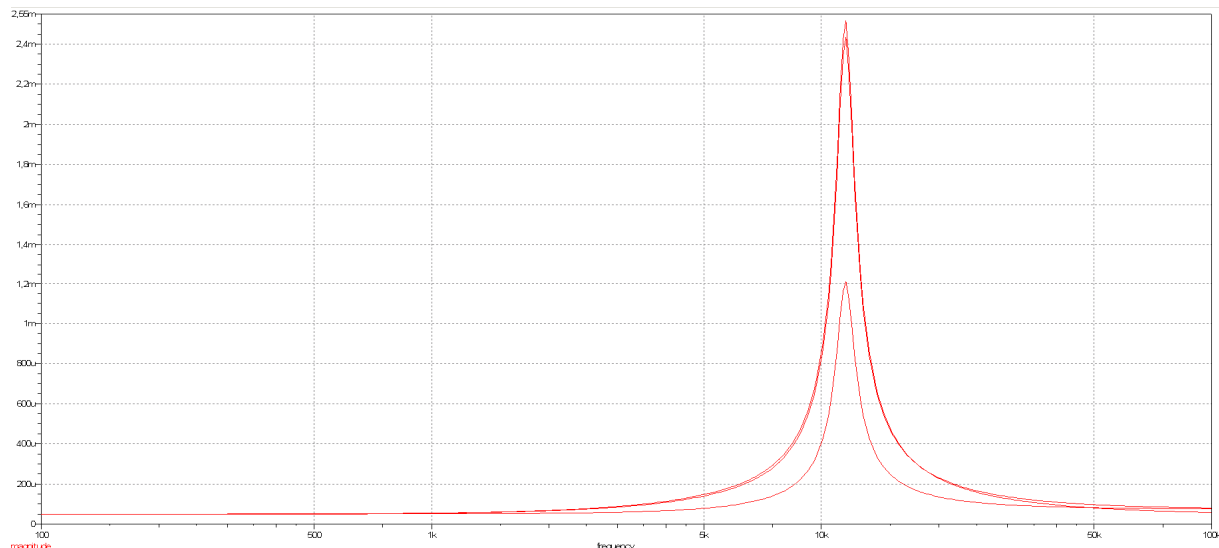
V programu SNAP jsem nakreslil schéma zapojení tak, jak je uvedeno na Obrázku 3.1. Nastavil jsem je pro jednotlivé činitele jakosti za pomoci Tabulky 3. Pro zobrazení napět'ových přenosů jsem výstupní člen musel umístit za každý operační zesilovač paralelně. Pro zobrazení admitančních přenosů jsem výstupní člen umístil sériově za každý operační zesilovač. Nevýhodou programu SNAP je, že nelze použít více výstupních členů najednou, takže zobrazování průběhu bylo zdouhavé. Napět'ový přenos nám ukáže, které kmitočty filtr zeslabuje nebo zesiluje. Transadmitanční přenos nám slouží pro výpočet odebíraného výstupního proudu.

Obrázek 3.2 je výstupem z programu SNAP, jedná se o napět'ový přenos. Odečtením z tohoto grafu zjistíme nejvyšší hodnotu napět'ového přenosu **19,73 dB** při kmitočtu **11,63 kHz**. Této hodnoty dosahuje Horní propust.



Obrázek 3.2 Napět'ový přenos KHN neinvertující pro $Q=10$

Obrázek 3.3 je opět výstupem programu SNAP a jedná se o admitanční přenos. Odečtením z toho grafu zjistíme nejvyšší hodnotu admitančního přenosu **2,51 mS** při kmitočtu **11,5 kHz**. Této hodnoty dosahuje Dolní propust.



Obrázek 3.3 Admitanční přenos KHN neinvertující pro $Q=10$

Na Obrázku 3.2 a 3.3 si lze všimnout, že k nejvyšším přenosům dochází při kmitočtu 11,5 kHz, což je velice rozdílná hodnota oproti námi požadované. Doporučení [2] tedy není moc přesné.

Souhrnný přehled přenosů všech napěťových a admitančních přenosů je uveden v Tabulce 4. Všechny ostatní obrázky napěťových a admitančních přenosů jsou umístěny v příloze na CD v dané složce k tomuto filtru.

Tabulka 4 Přehled napěťových a admitančních přenosů KHN neinvertující pro všechny Q

Napěťové přenosy	Q_1	Q_2	Q_5	Q_{10}
Horní propust [dB]	1,23	6,37	13,88	19,73
Pásmová propust [dB]	0	0	0	-0,12
Dolní propust [dB]	1,33	6,37	13,81	19,59

Admitanční přenosy	Q_1	Q_2	Q_5	Q_{10}
Horní propust [mS]	0,39	0,45	0,74	1,21
Pásmová propust [mS]	0,45	0,65	1,34	2,43
Dolní propust [mS]	0,28	0,54	1,31	2,51

3.1.3 Aplikace kritérií určující velikost vstupního signálu

Kritérium č. 1

Pro aplikaci kritéria č. 1 (2.1) je nutné nejdříve přepočítat napět'ové přenosy z dB na bezrozměrnou jednotku jako poměr U_2 k U_1 za pomoci (2.2). Vezmeme tedy nejvyšší hodnotu napět'ového přenosu a dosadíme.

$$F_n(f) = 10^{\frac{Au[dB]}{20}} = 10^{\frac{19,73}{20}} = 9,7 [-]$$

$$U_{1max} = \frac{U_{2max}}{F_n(f)} = \frac{10}{9,7} = 1,03 \text{ V}$$

Kritérium č. 2

Dosadíme do vzorce (2.3) nejvyšší hodnotu z admitančního přenosu a vypočítáme.

$$I_2 = Y_t(f) * U_{1max} = 2,51 * 10^{-3} * 1,03 = 2,58 \text{ mA}$$

Tuto hodnotu zkontrolujeme s katalogovou hodnotou (Tabulka 2) a vidíme, že výstupní proud splňuje podmínku $\leq 25 \text{ mA}$. Tato hodnota je v pořádku.

Kritérium č. 3

Dosadíme do vzorce (2.4) kmitočet, při kterém je dosaženo nejvyššího napět'ového přenosu, a vypočítáme.

$$SR = 2\pi * F_n(f) * U_{2max} * 10^{-6} = 2\pi * 11630 * 10 * 10^{-6} = 0,73 \text{ V}/\mu\text{S}$$

Po překontrolování s katalogovou hodnotou (Tabulka 2) zjistíme, že tato hodnota překračuje katalogovou hodnotu a je jediným omezujícím parametrem, tomuto parametru musíme přizpůsobit velikost vstupního signálu. Znovu tedy dosadíme hodnoty do vzorce (2.4) s tím rozdílem, že výsledek musí vyjít $\leq 0,5 \text{ V}/\mu\text{S}$, čehož dosáhneme snížením hodnoty výstupního napětí na 6,8 V.

$$SR = 2\pi * F_n(f) * U_{2max} * 10^{-6} = 2\pi * 11630 * 6,8 * 10^{-6} = 0,49 \text{ V}/\mu\text{S}$$

Nyní je splněna katalogová hodnota, musíme zpětně znovu přepočítat **kritérium č. 1**.

$$U_{1max} = \frac{U_{2max}}{F_n(f)} = \frac{6,8}{9,7} = 0,7 \text{ V}$$

A na závěr ještě **kritérium č. 2**.

$$I_2 = Y_t(f) * U_{1max} = 2,51 * 10^{-3} * 0,7 = 1,76 \text{ mA}$$

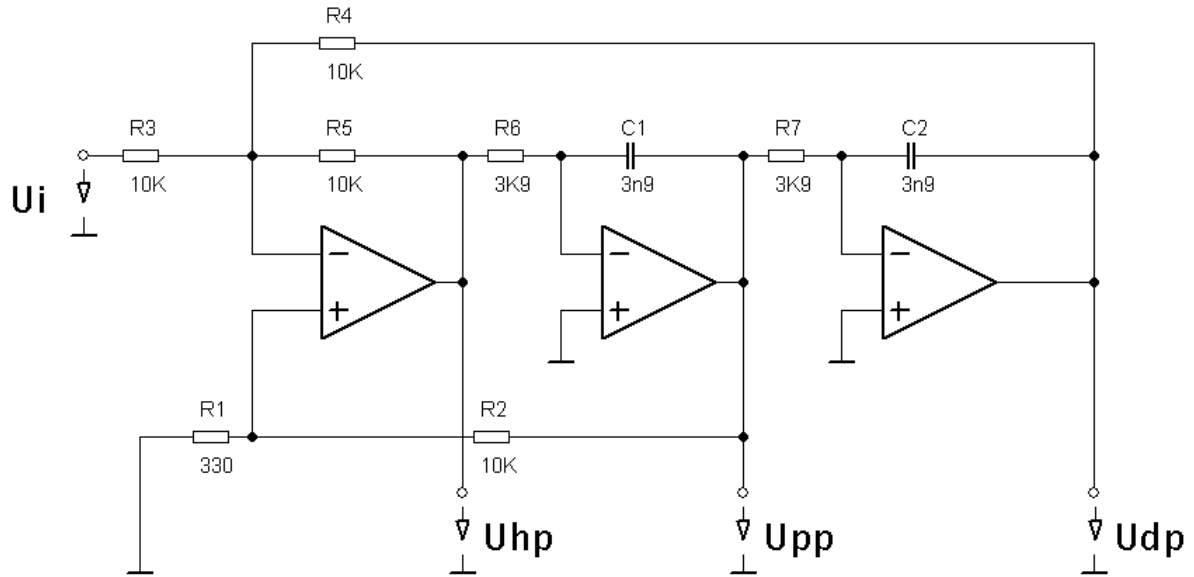
Ted' máme konečně vypočítané všechny hodnoty. Pokud všechny tyto hodnoty dodržíme, filtr se bude chovat lineárně.

V Tabulce 5 jsou uvedeny finální hodnoty pro všechny činitele jakosti, které když dodržíme, tak se bude elektronický filtr chovat lineárně

Tabulka 5 Parametry pro práci KHN neinvertující v lineární oblasti

	Q ₁	Q ₂	Q ₅	Q ₁₀
U _{1max} [V]	5,86	3,26	1,37	0,7
U _{2max} [V]	6,8	6,8	6,8	6,8
I _{2max} [mA]	2,63	2,12	1,83	1,76
SR [V/μS]	0,49	0,49	0,49	0,49

3.2 TAB-KHN v základním invertujícím zapojení



Obrázek 3.4 Schéma zapojení KHN invertující pro $Q=10$

3.2.1 Nastavení filtru

Výpočet hodnot si ukážeme na činiteli jakosti $Q = 10$, pro ostatní Q je výpočet obdobný.

V doporučení [3] nejsou přímo určeny velikosti kapacit C , proto použijeme doporučení pro předchozí filtr, tyto filtry jsou téměř shodné. Z doporučení [2] získáme tedy vzorce pro výpočet kapacit (3.1) a (3.2), dále volíme $C_1 = C_2 = C$.

$$C = \frac{3,3 \cdot 10^{-7}}{\sqrt{f_0}} = \frac{3,3 \cdot 10^{-7}}{\sqrt{10000}} = 3,3 \cdot 10^{-9} \text{ F}$$

$$C_{min} = 4 \cdot 10^{-11} \cdot Q^2 = 4 \cdot 10^{-11} \cdot 10^2 = 4 \cdot 10^{-9} \text{ F}$$

Vypočtená hodnota z (3.1) je nižší než doporučená minimální hodnota kapacity z (3.2), proto zvolíme z řady E12 nejbližší hodnotu doporučeného minima, což je **3,9 nF**. Tuto velikost kondenzátoru použijeme i pro ostatní činitele jakosti, protože vyšší kapacita nijak neuškodí v zapojení a v experimentálním zapojení nebude potřeba více součástek.

Výpočet hodnot rezistorů provedeme zase dle doporučení [3]. Ostatní použité rezistory volíme $R_3 = R_4 = R_5 = 10 \text{ k}\Omega$. Dále zvolíme $R_6 = R_7 = R$. Vzorec pro výpočet rezistorů R (3.11) získáme vyvozením ze vzorce pro výpočet požadovaného kmitočtu (3.10).

$$f_p = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} \quad (3.10)$$

$$\text{Odvození:} \quad f_p = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} \Rightarrow R = \frac{1}{2\pi \cdot C \cdot f_0} \quad (3.11)$$

Dosazením do vzorce (3.11) získáváme společnou hodnotu odporu R .

$$R = \frac{1}{2\pi * C * f_0} = \frac{1}{2\pi * 3,9 * 10^{-9} * 10000} = 4\,080\,\Omega$$

Z řady E24 tedy vybereme nejbližší hodnotu což je **3 900 Ω** .

Zpětnou kontrolou kmitočtu (3.10) ověříme správné nastavení filtru.

$$f_p = \frac{1}{2\pi * 3,9 * 10^{-9} * 3900} = 10\,463\,Hz$$

Kmitočet je mírně vyšší, což je zapříčiněno zaokrouhlením kapacit a rezistorů do řady. Již teď vidíme výhodu oproti zapojení, které je popsáno v kapitole 3.1 a to takovou, že nejvyšší napětěvé a admitanční přenosy budou pro všechna Q na stejných kmitočtech.

Vyvozením ze vztahu pro výpočet kvality pólů (3.12) získáme vzorec pro výpočet poměru hodnot rezistoru R_1 a R_2 (3.13).

$$Q = \frac{1}{3} * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (3.12)$$

$$\text{Odvození:} \quad Q = \frac{1}{3} * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \Rightarrow \frac{R_2}{R_1} = 3 * Q - 1 \quad (3.13)$$

Abychom mohli vypočítat obě hodnoty rezistoru, je třeba jednu hodnotu zvolit. Rezistoru R_2 tedy přiřadíme **10 k Ω** a dosadíme do vzorce (3.13). Další výhodou tohoto filtru po konstrukční stránce je, že nastavení do jednotlivých činitelů jakosti se provádí výměnou jen jedné součástky.

$$\frac{R_2}{R_1} = 3 * Q - 1 = \frac{10\,000}{R_1} = 3 * 10 - 1 = 29 \Rightarrow R_1 = \frac{10\,000}{29} = 344\,\Omega$$

Hodnotu rezistoru R_1 vybereme z řady E24, tedy **330 Ω** .

Zpětnou kontrolou kvality pólů můžeme ověřit správnou volbu součástek. Dosadíme vypočtené hodnoty součástek do vzorce (3.12).

$$Q = \frac{1}{3} * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = \frac{1}{3} * \left(1 + \frac{10\,000}{330}\right) = 10,43 [-]$$

Hodnota kvality pólů vyšla mírně vyšší, což je způsobeno zaokrouhlením rezistorů do řady.

V Tabulce 6 je uveden výčet všech vypočtených součástek pro všechny činitelé jakosti.

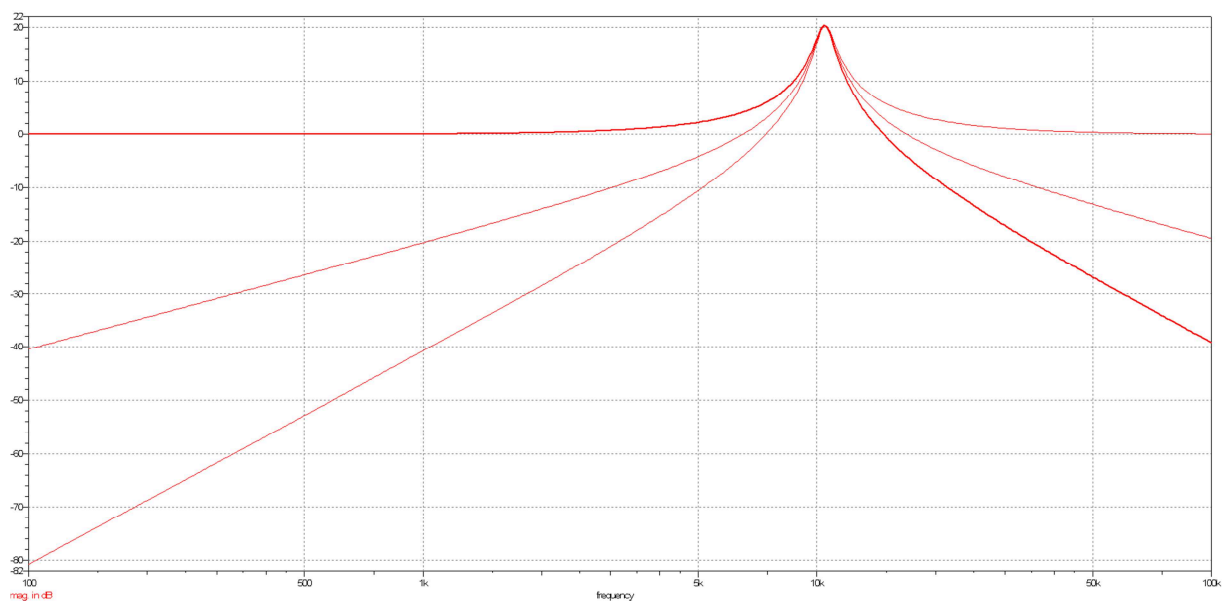
Tabulka 6 Seznam součástek KHN invertující pro všechna Q

	Q_1	Q_2	Q_5	Q_{10}
$R_1 [\Omega]$	5 100	2 000	680 + 33	330
$R_2 [\Omega]$	10 000	10 000	10 000	10 000
$R_3 [\Omega]$	10 000	10 000	10 000	10 000
$R_4 [\Omega]$	10 000	10 000	10 000	10 000
$R_5 [\Omega]$	10 000	10 000	10 000	10 000
$R_6 [\Omega]$	3 900	3 900	3 900	3 900
$R_7 [\Omega]$	3 900	3 900	3 900	3 900
$C_1 [\text{nF}]$	3,9	3,9	3,9	3,9
$C_2 [\text{nF}]$	3,9	3,9	3,9	3,9

3.2.2 Simulace programem SNAP

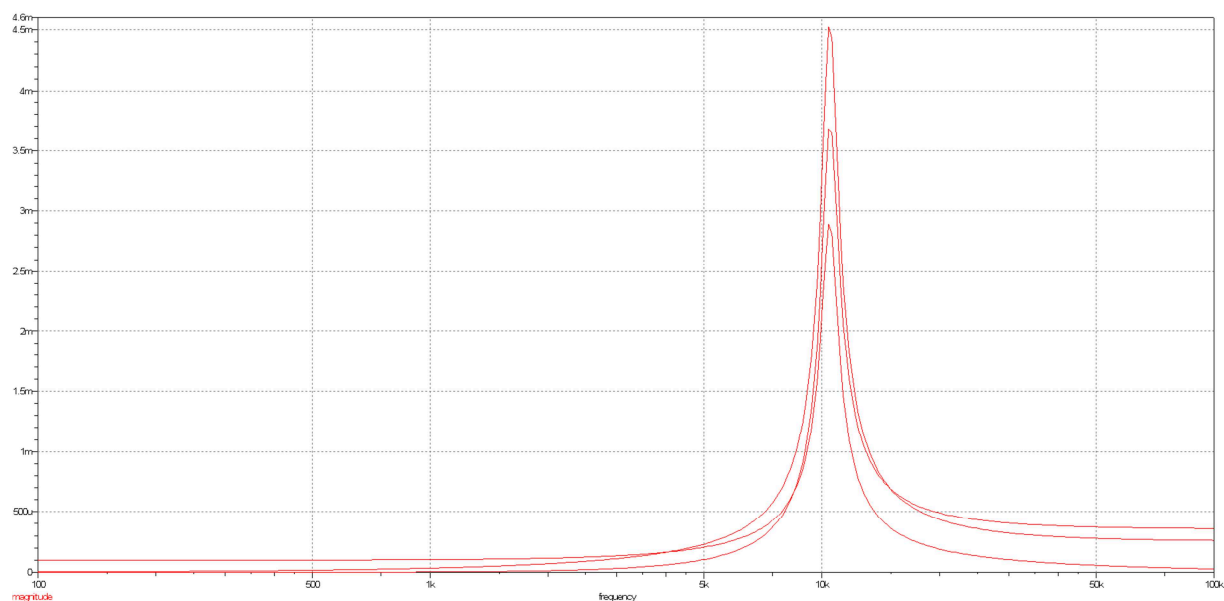
Postup práce s programem SNAP je již popsán v kapitole 3.1.2. Zde jsem postupoval úplně stejně. S tím rozdílem, že jsem použil schéma zapojení popsané na Obrázku 3.4.

Na Obrázku 3.5 vidíme výstup z programu SNAP, jedná se o napětový přenos. Odečtením z grafu zjistíme, že nejvyšší hodnota napětového přenosu je **20,3 dB** při kmitočtu **10 500 Hz**. Všechny tři propusti dosahují téměř stejného maxima.



Obrázek 3.5 Napětový přenos KHN invertující pro $Q=10$

Na obrázku 3.6 je admitanční přenos. Nejvyšší hodnoty **4,46 mS** dosahuje pásmová propust při kmitočtu **10 500 Hz**.



Obrázek 3.6 Admitanční přenos KHN invertující pro $Q=10$

Předchozí obrázky 3.5 a 3.6 nám prozradili, že k nejvyšším napěťovým a admitančním přenosům dochází při kmitočtu 10,5 kHz, což nám přesně koresponduje s vypočteným kmitočtem. Doporučení [3] k tomuto elektronickému filtru je tedy velice přesné.

Souhrnný přehled přenosů pro všechny činitele jakosti je uveden v Tabulce 7. Všechny ostatní obrázky napěťových a admitančních přenosů jsou umístěny v příloze na CD v dané složce k tomuto filtru.

Tabulka 7 Přehled napěťových a admitančních přenosů KHN invertující pro všechna Q

Napěťové přenosy	Q_1	Q_2	Q_5	Q_{10}
Horní propust [dB]	1,2	6,3	14	20,3
Pásmová propust [dB]	-0,1	6	14	20,2
Dolní propust [dB]	1,2	6,3	14	20,3

Admitanční přenosy	Q_1	Q_2	Q_5	Q_{10}
Horní propust [mS]	0,41	0,73	1,79	3,63
Pásmová propust [mS]	0,42	0,85	2,17	4,46
Dolní propust [mS]	0,30	0,58	1,41	2,85

3.2.3 Aplikace kritérií určující velikost vstupního signálu

Kritérium č. 1

Pro aplikaci kritéria č. 1 (2.1) je nutné nejdříve přepočítat napět'ové přenosy z dB na bezrozměrnou jednotku jako poměr U_2 k U_1 za pomoci (2.2). Vezmeme tedy nejvyšší hodnotu napět'ového přenosu a dosadíme.

$$F_n(f) = 10^{\frac{Au[dB]}{20}} = 10^{\frac{20,3}{20}} = 10,35 [-]$$

$$U_{1max} = \frac{U_{2max}}{F_n(f)} = \frac{10}{10,35} = 0,96 V$$

Kritérium č. 2

Dosadíme do vzorce (2.3) nejvyšší hodnotu z admitančního přenosu a vypočítáme.

$$I_2 = Y_t(f) * U_{1max} = 4,46 * 10^{-3} * 0,96 = 4,28 mA$$

Tuto hodnotu zkontrolujeme s katalogovou hodnotou (Tabulka 2) a vidíme, že výstupní proud splňuje podmínku $\leq 25 mA$. Tato hodnota je v pořádku.

Kritérium č. 3

Dosadíme do vzorce (2.4) kmitočet, při kterém je dosaženo nejvyššího napět'ového přenosu, a vypočítáme.

$$SR = 2\pi * F_n(f) * U_{2max} * 10^{-6} = 2\pi * 10500 * 10 * 10^{-6} = 0,66 V/\mu S$$

Po překontrolování s katalogovou hodnotou (Tabulka 2) zjistíme, že tato hodnota překračuje katalogovou hodnotu a je jediným omezujícím parametrem, tomuto parametru musíme přizpůsobit velikost vstupního signálu. Znovu tedy dosadíme hodnoty do vzorce (2.4) s tím rozdílem, že výsledek musí vyjít $\leq 0,5 V/\mu S$, čehož dosáhneme snížením hodnoty výstupního napětí na 7,5 V.

$$SR = 2\pi * F_n(f) * U_{2max} * 10^{-6} = 2\pi * 10500 * 7,5 * 10^{-6} = 0,49 V/\mu S$$

Nyní je splněna katalogová hodnota, musíme zpětně znovu přepočítat **kritérium č. 1**.

$$U_{1max} = \frac{U_{2max}}{F_n(f)} = \frac{7,5}{10,35} = 0,72 V$$

A na závěr ještě **kritérium č. 2**.

$$I_2 = Y_t(f) * U_{1max} = 4,46 * 10^{-3} * 0,72 = 3,21 mA$$

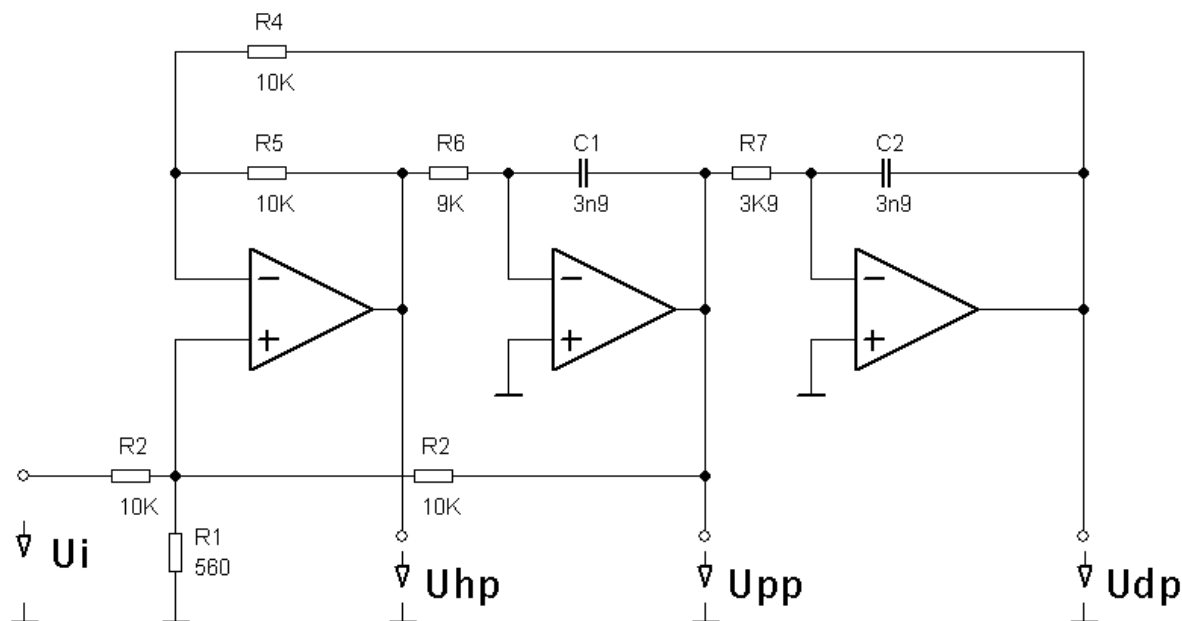
Ted' máme konečně vypočítané všechny hodnoty. Pokud všechny tyto hodnoty dodržíme, filtr se bude chovat lineárně.

V Tabulce 8 jsou uvedeny finální hodnoty pro všechny činitelé jakosti, které když dodržíme, bude se elektronický filtr chovat lineárně.

Tabulka 8 Parametry pro práci KHN invertující v lineární oblasti

	Q ₁	Q ₂	Q ₅	Q ₁₀
U _{1max} [V]	5,06	3,64	1,49	0,72
U _{2max} [V]	7,5	7,5	7,5	7,5
I _{2max} [mA]	2,12	3,1	3,23	3,21
SR [V/μS]	0,49	0,49	0,49	0,49

3.3 TAB-KHN v modifikovaném neinvertujícím zapojení



Obrázek 3.7 Schéma zapojení KHN modifikovaný neinvertující pro $Q=10$

3.3.1 Nastavení filtru

Výpočet hodnot si ukážeme na činiteli jakosti $Q = 10$, pro ostatní Q je výpočet obdobný.

Protože doporučení v [3] je výpočet kapacitorů C a rezistorů R úplně stejné jako v přechodném návrhu (Kapitola 3.2.1.) nebudu jej tedy vypisovat. Ostatní použité rezistory volíme $R_4 = R_5 = 10 \text{ k}\Omega$. Stejný bude i kmitočet nejvyššího napětového a admitančního přenosu tj. $10\,463 \text{ Hz}$. Rozdíl nastává až ve výpočtu rezistorů R_1 a R_2 ze vzorce (3.15), který si musíme nejdříve vyvodit z vzorce pro výpočet kvality pólů (3.14).

$$Q = 1 + \frac{R_2}{2 \cdot R_1} \quad (3.14)$$

Odvození:
$$Q = 1 + \frac{R_2}{2 \cdot R_1} \Rightarrow \frac{R_2}{R_1} = 2 \cdot Q - 2 \quad (3.15)$$

Abychom mohli vypočítat obě hodnoty rezistoru, je třeba jednu hodnotu zvolit. Rezistoru R_2 tedy vybereme **10 k Ω** a dosadíme do vzorce (3.15). Další výhodou tohoto filtru po konstrukční stránce je, že nastavení do jednotlivých činitelů jakosti se provádí výměnou jen jedné součástky.

$$\frac{R_2}{R_1} = 2 \cdot Q - 2 = \frac{10\,000}{R_1} = 2 \cdot 10 - 2 = 18 \Rightarrow R_1 = \frac{10\,000}{18} = 555 \, \Omega$$

Hodnotu rezistoru R_1 vybereme z řady E24 tedy **560 Ω** .

Zpětnou kontrolou kvality pólů můžeme ověřit správnou volbu součástek. Dosadíme vypočtené hodnoty součástek do vzorce (3.14).

$$Q = 1 + \frac{R_2}{2 * R_1} = 1 + \frac{10\,000}{2 * 560} = 9,92$$

Hodnota kvality pólů vyšla mírně nižší, což je způsobeno zaokrouhlením rezistorů do řady.

V Tabulce 9 je uveden výčet všech vypočtených součástek pro všechny činitelé jakosti.

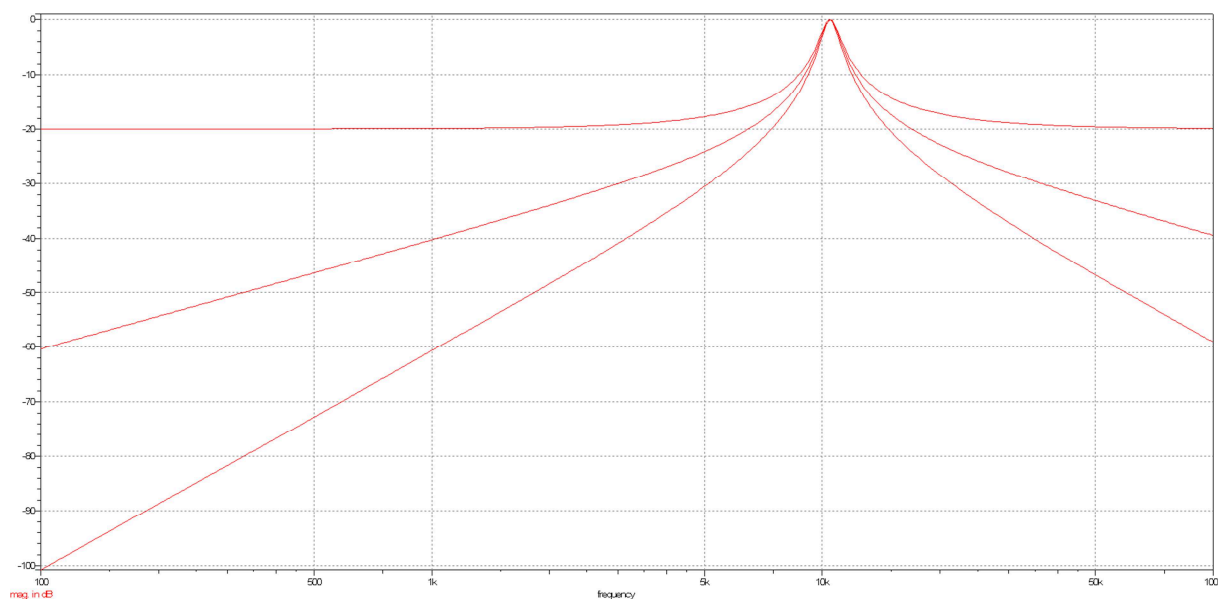
Tabulka 9 Seznam součástek KHN modifikovaný pro všechna Q

	Q_1	Q_2	Q_5	Q_{10}
R_1 [Ω]	-	5 100	1 200	560
R_2 [Ω]	10 000	10 000	10 000	10 000
R_4 [Ω]	10 000	10 000	10 000	10 000
R_5 [Ω]	10 000	10 000	10 000	10 000
R_6 [Ω]	3 900	3 900	3 900	3 900
R_7 [Ω]	3 900	3 900	3 900	3 900
C_1 [nF]	3,9	3,9	3,9	3,9
C_2 [nF]	3,9	3,9	3,9	3,9

3.3.2 Simulace programem SNAP

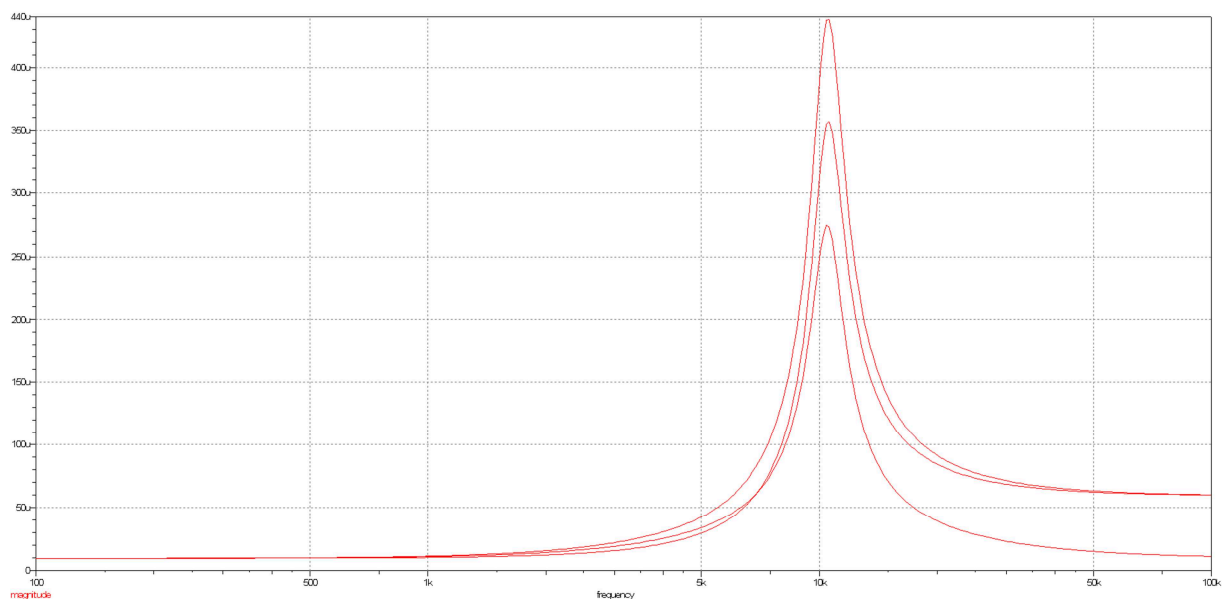
Postup práce s programem SNAP je již popsán v kapitole 3.1.2. Zde jsem postupoval úplně stejně. S tím rozdílem, že jsem použil schéma zapojení popsané na Obrázku 3.7.

Na Obrázku 3.8 vidíme napěťový přenos vygenerovaný programem SNAP, kdy nejvyšší hodnota přenosu dosahuje při kmitočtu **10 500 Hz** hodnoty **0dB**, což v praxi znamená, že signál nebude nijak zesílen a výstupní signál nebude tímto parametrem omezen.



Obrázek 3.8 Napěťový přenos KHN modifikovaný pro $Q=10$

Na obrázku 3.9 je admitanční přenos. Nejvyšší hodnoty **0,43 mS** dosahuje pásmová propust při kmitočtu **10 500 Hz**.



Obrázek 3.9 Admitanční přenos pro KHN modifikovaný pro $Q=10$

Předchozí obrázky 3.8 a 3.9 nám ukázali, že k nejvyšším napěťovým a admitančním přenosům dochází při kmitočtu 10,5 kHz. Doporučení [3] k tomuto elektronickému filtru je velice přesné. Dále nedochází k žádnému zesílení výstupního signálu, tudíž vstupní signál nebude tímto nijak omezen.

Souhrnný přehled přenosů pro všechny činitele jakosti je uveden v Tabulce 10. Všechny ostatní obrázky napěťových a admitančních přenosů jsou umístěny v příloze na CD v dané složce k tomuto filtru.

Tabulka 10 Přehled napěťových a admitančních přenosů KHN modifikovaný pro všechna Q

Napěťové přenosy	Q_1	Q_2	Q_5	Q_{10}
Horní propust [dB]	1,3	0,3	0	0
Pásmová propust [dB]	0	0	0	0
Dolní propust [dB]	1,2	1,2	0	0

Admitanční přenosy	Q_1	Q_2	Q_5	Q_{10}
Horní propust [mS]	0,39	0,36	0,36	0,35
Pásmová propust [mS]	0,45	0,44	0,41	0,43
Dolní propust [mS]	0,28	0,28	0,27	0,27

3.3.3 Aplikace kritérií určující velikost vstupního signálu

Kritérium č. 1

Pro aplikaci kritéria č. 1 (2.1) je nutné nejdříve přepočítat napěťové přenosy z dB na bezrozměrnou jednotku jako poměr U_2 k U_1 za pomoci (2.2). Vezmeme tedy nejvyšší hodnotu napěťového přenosu a dosadíme. Pro činitel jakosti $Q=10$ je hodnota zesílení rovná 0, tzn., že vstupní signál nebude tímto kritériem nijak omezen.

$$F_n(f) = 10^{\frac{Au[dB]}{20}} = 10^{\frac{0}{20}} = 1 [-]$$

$$U_{1max} = \frac{U_{2max}}{F_n(f)} = \frac{10}{1} = 10 \text{ V}$$

Kritérium č. 2

Dosadíme do vzorce (2.3) nejvyšší hodnotu z admitančního přenosu a vypočítáme.

$$I_2 = Y_t(f) * U_{1max} = 0,43 * 10^{-3} * 10 = 4,3 \text{ mA}$$

Tuto hodnotu zkontrolujeme s katalogovou hodnotou (Tabulka 2) a vidíme, že výstupní proud splňuje podmínku $\leq 25 \text{ mA}$. Tato hodnota je v pořádku.

Kritérium č. 3

Dosadíme do vzorce (2.4) kmitočet, při kterém je dosaženo nejvyššího napěťového přenosu, a vypočítáme.

$$SR = 2\pi * F_n(f) * U_{2max} * 10^{-6} = 2\pi * 10500 * 10 * 10^{-6} = 0,66 \text{ V}/\mu\text{S}$$

Po překontrolování s katalogovou hodnotou (Tabulka 2) zjistíme, že tato hodnota překračuje katalogovou hodnotu a je jediným omezujícím parametrem, tomuto parametru musíme přizpůsobit velikost vstupního signálu. Znovu tedy dosadíme hodnoty do vzorce (2.4) s tím rozdílem, že výsledek musí vyjít $\leq 0,5 \text{ V}/\mu\text{S}$, čehož dosáhneme snížením hodnoty výstupního napětí na 7,5 V.

$$SR = 2\pi * F_n(f) * U_{2max} * 10^{-6} = 2\pi * 10500 * 7,5 * 10^{-6} = 0,49 \text{ V}/\mu\text{S}$$

Nyní je splněna katalogová hodnota, musíme zpětně znovu přepočítat **kritérium č. 1**.

$$U_{1max} = \frac{U_{2max}}{F_n(f)} = \frac{7,5}{1} = 7,5 \text{ V}$$

A na závěr ještě **kritérium č. 2**.

$$I_2 = Y_t(f) * U_{1max} = 0,43 * 10^{-3} * 7,5 = 3,23 \text{ mA}$$

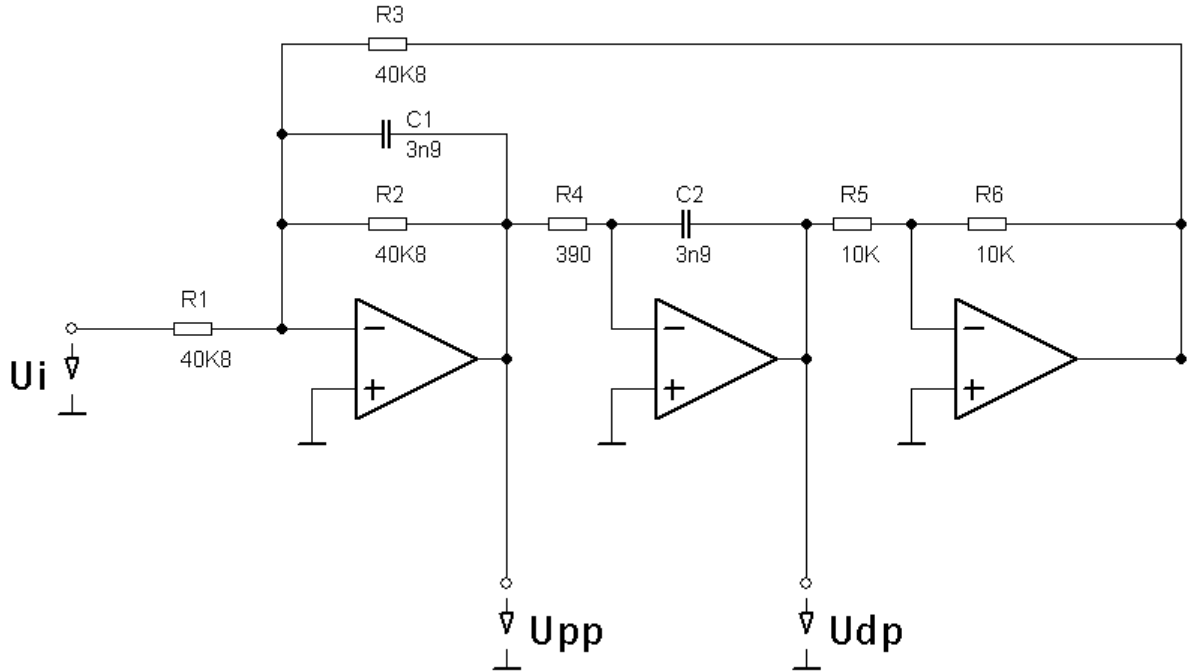
Ted' máme konečně vypočítané všechny hodnoty. Pokud všechny tyto hodnoty dodržíme, filtr se bude chovat lineárně.

V Tabulce 11 jsou uvedeny finální hodnoty pro všechny činitele jakosti, které když dodržíme, tak se bude elektronický filtr chovat lineárně

Tabulka 11 Parametry pro práci KHN modifikovaný v lineární oblasti

	Q ₁	Q ₂	Q ₅	Q ₁₀
U _{1max} [V]	6,46	6,52	7,5	7,5
U _{2max} [V]	7,5	7,5	7,5	7,5
I _{2max} [mA]	2,91	2,87	3,23	3,23
SR [V/μS]	0,49	0,49	0,49	0,49

3.4 TAB-TT v základním invertujícím zapojení



Obrázek 3.10 Schéma zapojení TT invertující pro $Q=10$

3.4.1 Nastavení filtru

Výpočet hodnot si ukážeme na činiteli jakosti $Q = 10$, pro ostatní Q je výpočet obdobný.

Z doporučení [2] získáme potřebné vzorečky pro výpočet hodnot kapacit a rezistorů. Jedná se o téměř stejné zapojení, jako je popsáno v kapitole 3.1, ale s tím rozdílem, že tento filtr nám neumožňuje výstup ve formě Horní propusti. Výpočet kapacit je úplně stejný, tj. hodnota **$C=3,9 \text{ nF}$** .

V dokumentaci [2] je také doporučeno volit stejné rezistory $R_5 = R_6$, kterým přiřadíme hodnotu $10 \text{ k}\Omega$. Rezistory $R_3 = R_2 = R_1$ jsou také stejné a jejich hodnotu získáme dosazením do vzorce (3.16). Dosazením do vzorce (3.17) získáme hodnotu rezistoru R_4 .

$$R_3 = \frac{Q}{2\pi f_0 C} = \frac{10}{2\pi \cdot 10\,000 \cdot 3,9 \cdot 10^{-9}} = 40\,808 \, \Omega \quad (3.16)$$

$$R_4 = \frac{1}{2\pi f_0 C Q} = \frac{1}{2\pi \cdot 10\,000 \cdot 3,9 \cdot 10^{-9} \cdot 10} = 408 \, \Omega \quad (3.17)$$

Zařazením hodnot do řady E24 nám vyjde $R_3 = R_2 = R_1 = \mathbf{39 \text{ k}\Omega + 1,8 \text{ k}\Omega}$, sériová kombinace dvou rezistorů pro vyšší přesnost. Rezistor R_4 v řadě E24 má hodnotu **$390 \, \Omega$** .

Zpětnou kontrolou kmitočtu ověřím správnou volbu rezistoru R_3 a R_4 . Pomocí vztahu (3.18) si vyvodím vztah (3.19) pro výpočet frekvence.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_3 R_4 C_1 C_2}} \quad (3.18)$$

$$\text{Odvození:} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_3 R_4 C_1 C_2}} = \frac{1}{C \sqrt{R_3 R_4}} \Rightarrow f_p = \frac{1}{2\pi C \sqrt{R_3 R_4}} \quad (3.19)$$

Dosazením do vzorečku (3.19) tedy zjistíme kmitočet, při kterém bude mít filtr nejvyšší hodnotu napět'ového a admitančního přenosu.

$$f_p = \frac{1}{2\pi * C * \sqrt{R_3 * R_4}} = \frac{1}{2\pi * 3,3 * 10^{-9} * \sqrt{40\,800 * 390}} = 9\,744\text{ Hz}$$

Výsledný kmitočet je mírně nižší, což je zapříčiněno zaokrouhlením součástek do řady.

V Tabulce 12 je uveden výčet všech vypočtených součástek pro všechny činitelé jakosti.

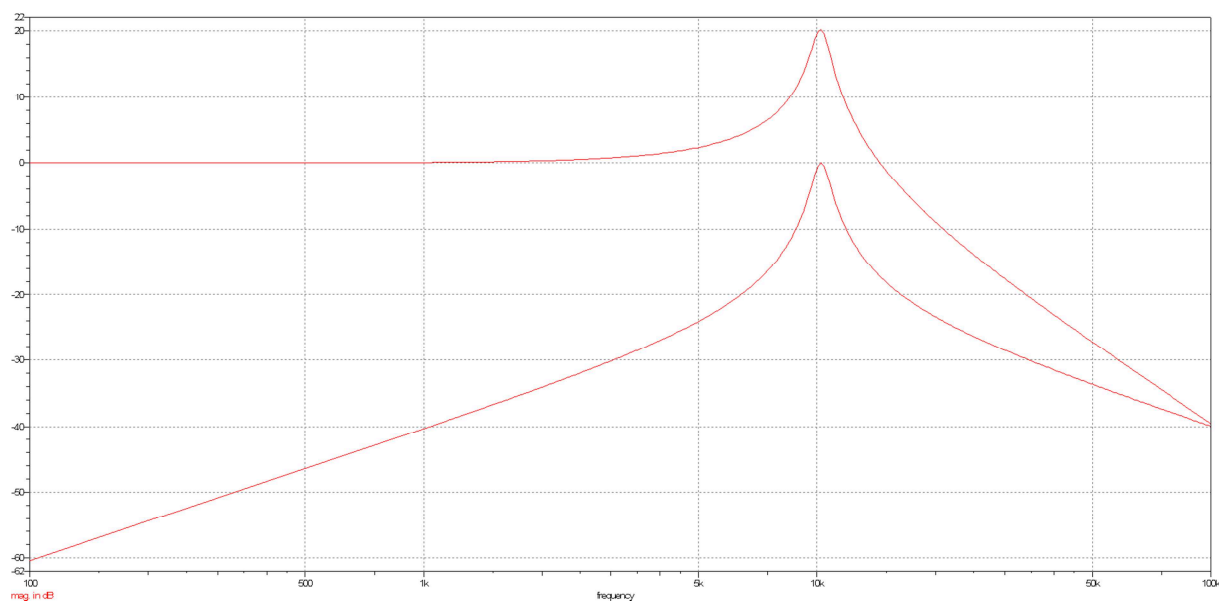
Tabulka 12 Seznam součástek TT invertující pro všechna Q

	Q ₁	Q ₂	Q ₅	Q ₁₀
R ₁ [Ω]	3 900	8 200	20 000	39 000 + 1 800
R ₂ [Ω]	3 900	8 200	20 000	39 000 + 1 800
R ₃ [Ω]	3 900	8 200	20 000	39 000 + 1 800
R ₄ [Ω]	3 900	2 000	820	390
R ₅ [Ω]	10 000	10 000	10 000	10 000
R ₆ [Ω]	3 900	10 000	10 000	10 000
C ₁ [nF]	3,9	3,9	3,9	3,9
C ₂ [nF]	3,9	3,9	3,9	3,9

3.4.2 Simulace programem SNAP

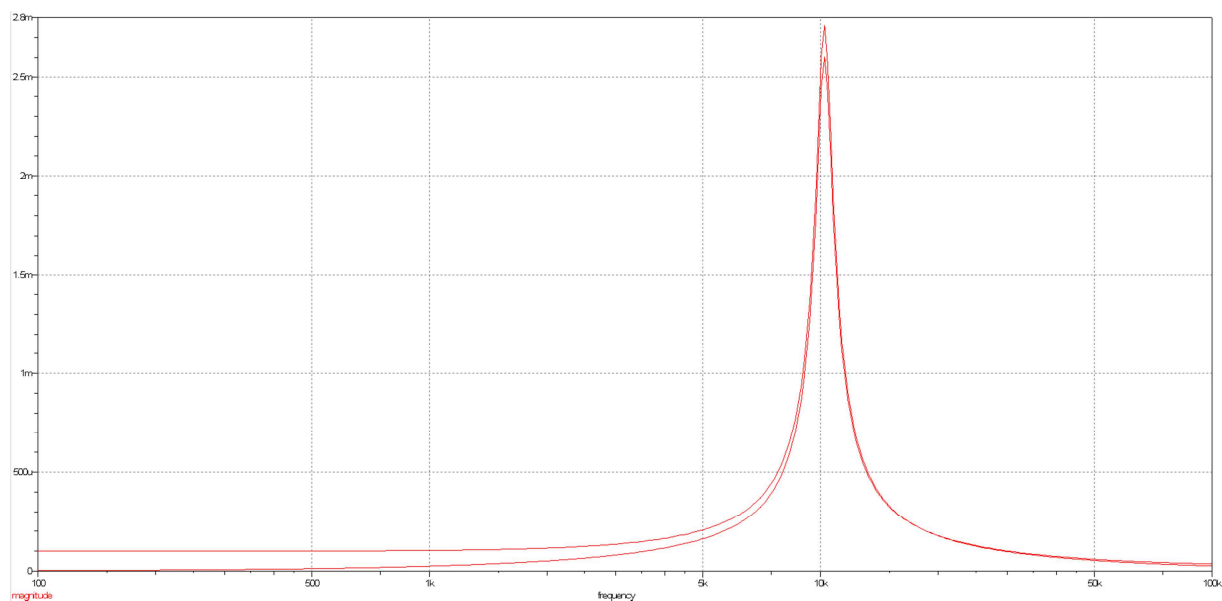
Postup práce s programem SNAP je již popsán v kapitole 3.1.2. Zde jsem postupoval úplně stejně. S tím rozdílem, že jsem použil schéma zapojení popsané na Obrázku 3.10.

Na Obrázku 3.11 vidíme napět'ový přenos vygenerovaný programem SNAP, kdy nejvyšší hodnota přenosu dosahuje při kmitočtu **10 250 Hz** hodnoty **20,1 dB**. Této hodnoty dosahuje Dolní propust.



Obrázek 3.11 Napět'ový přenos TT invertující pro Q=10

Na obrázku 3.12 je admitanční přenos. Nejvyšší hodnoty **2,74 mS** dosahuje Dolní propust při kmitočtu **10 250 Hz**.



Obrázek 3.12 Admitanční přenos TT invertující pro $Q=10$

K nejvyšším napěťovým a admitančním přenosům dochází při kmitočtu 10 250 Hz, což je přijatelná hodnota.

Souhrnný přehled přenosů pro všechny činitele jakosti je uveden v Tabulce 13. Všechny ostatní obrázky napěťových a admitančních přenosů jsou umístěny v příloze na CD v dané složce k tomuto filtru.

Tabulka 13 Přehled napěťových a admitančních přenosů TT invertující pro všechna Q

Napěťové přenosy	Q_1	Q_2	Q_5	Q_{10}
Pásmová propust [dB]	0	0	0	0
Dolní propust [dB]	1,2	6,4	13,8	20,1

Admitanční přenosy	Q_1	Q_2	Q_5	Q_{10}
Pásmová propust [mS]	0,58	0,67	1,28	2,58
Dolní propust [mS]	0,28	0,54	1,32	2,74

3.4.3 Aplikace kritérií určující velikost vstupního signálu

Kritérium č. 1

Pro aplikaci kritéria č. 1 (2.1) je nutné nejdříve přepočítat napětíové přenosy z dB na bezrozměrnou jednotku jako poměr U_2 k U_1 za pomoci (2.2). Vezmeme tedy nejvyšší hodnotu napětíového přenosu a dosadíme.

$$F_n(f) = 10^{\frac{Au[dB]}{20}} = 10^{\frac{20,1}{20}} = 10,11 [-]$$

$$U_{1max} = \frac{U_{2max}}{F_n(f)} = \frac{10}{10,11} = 0,99 V$$

Kritérium č. 2

Dosadíme do vzorce (2.3) nejvyšší hodnotu z admitančního přenosu a vypočítáme.

$$I_2 = Y_t(f) * U_{1max} = 2,74 * 10^{-3} * 0,99 = 2,71 mA$$

Tuto hodnotu zkontrolujeme s katalogovou hodnotou (Tabulka 2) a vidíme, že výstupní proud splňuje podmínku $\leq 25 mA$. Tato hodnota je v pořádku.

Kritérium č. 3

Dosadíme do vzorce (2.4) kmitočet, při kterém je dosaženo nejvyššího napětíového přenosu, a vypočítáme.

$$SR = 2\pi * F_n(f) * U_{2max} * 10^{-6} = 2\pi * 10250 * 10 * 10^{-6} = 0,64 V/\mu S$$

Po překontrolování s katalogovou hodnotou (Tabulka 2) zjistíme, že tato hodnota překračuje katalogovou hodnotu a je jediným omezujícím parametrem, tomuto parametru musíme přizpůsobit velikost vstupního signálu. Znovu tedy dosadíme hodnoty do vzorce (2.4) s tím rozdílem, že výsledek musí vyjít $\leq 0,5 V/\mu S$, čehož dosáhneme snížením hodnoty výstupního napětí na 7,7 V.

$$SR = 2\pi * F_n(f) * U_{2max} * 10^{-6} = 2\pi * 10250 * 7,7 * 10^{-6} = 0,49 V/\mu S$$

Nyní je splněna katalogová hodnota, musíme zpětně znovu přepočítat **kritérium č. 1**.

$$U_{1max} = \frac{U_{2max}}{F_n(f)} = \frac{7,7}{10,11} = 0,76 V$$

A na závěr ještě **kritérium č. 2**.

$$I_2 = Y_t(f) * U_{1max} = 2,74 * 10^{-3} * 0,76 = 2,08 mA$$

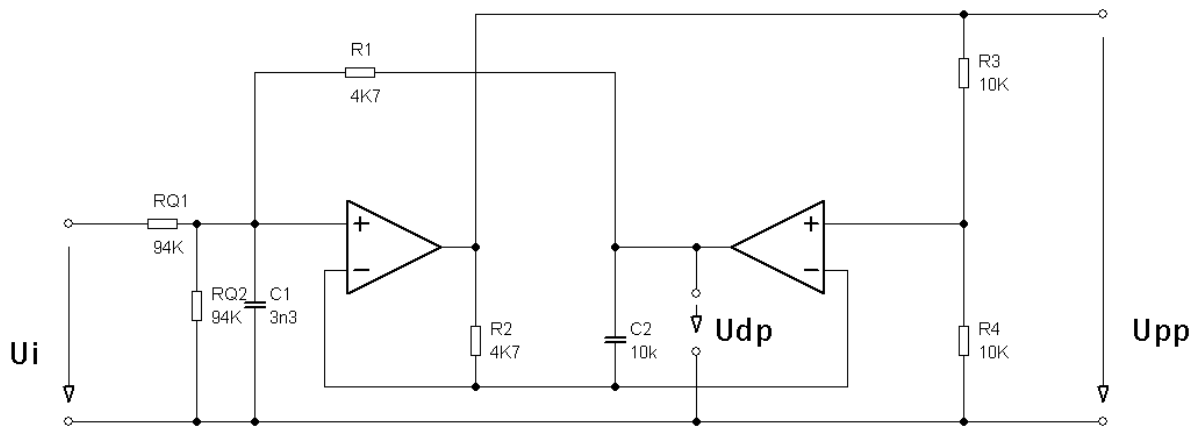
Ted' máme konečně vypočítané všechny hodnoty. Pokud všechny tyto hodnoty dodržíme, filtr se bude chovat lineárně.

V Tabulce 14 jsou uvedeny finální hodnoty pro všechny činitelé jakosti, které když dodržíme, tak se bude elektronický filtr chovat lineárně.

Tabulka 14 Parametry pro práci TT invertující v lineární oblasti

	Q ₁	Q ₂	Q ₅	Q ₁₀
U _{1max} [V]	6,52	3,68	1,57	0,76
U _{2max} [V]	7,7	7,7	7,7	7,7
I _{2max} [mA]	3,78	2,46	2,07	2,08
SR [V/μS]	0,49	0,49	0,49	0,49

3.5 Pásmová propust 2. řádu se 2 operačními zesilovači



Obrázek 3.13 Schéma zapojení Pásmová propust 2. Řádu pro $Q=10$

3.5.1 Nastavení filtru

Z doporučení [4] získáme vzorečky pro výpočet kapacit a rezistorů. Výpočet kondenzátorů se provádí stejným způsobem, jako je popsáno v Kapitole 3.1.1, ale s tím rozdílem, že není vyžadováno kapacitní minimum (3.2), tzn. dosazením do vzorečku (3.1) získáme hodnotu kapacity.

$$C = \frac{3,3 \cdot 10^{-7}}{\sqrt{f_0}} = \frac{3,3 \cdot 10^{-7}}{\sqrt{10000}} = 3,3 \cdot 10^{-9} \text{ F}$$

Výsledná hodnota kapacity je tedy z řady E12 $C = 3,3 \text{ pF}$.

Dle doporučení [4] k tomu elektronickému filtru je doporučeno zvolit hodnotu R_3 a R_4 v rozmezí 10 – 100 k Ω , vybral jsem nejnižší hodnotu 10 k Ω . Rezistory $R_1 = R_2 = R$, vypočítám ze vzorce (3.20).

$$R = \frac{1}{2\pi \cdot f_0 \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 10\,000 \cdot 3,3 \cdot 10^{-9}} = 4\,822 \, \Omega \quad (3.20)$$

Výslednou hodnotou z řady E24 tedy bude **4 700 Ω** . Abychom mohli dopočítat hodnoty rezistorů R_{Q1} (3.21) a R_{Q2} (3.22), musíme nejdříve použít koeficient (3.23) a až posléze dosadit. Postupným dosazováním do těchto vzorečků získáme požadované hodnoty rezistorů.

$$R_Q = Q \cdot R = 10 \cdot 4\,700 = 47\,000 \, \Omega \quad (3.23)$$

$$R_{Q1} = \frac{2 \cdot R_Q}{1} = \frac{2 \cdot 47\,000}{1} = 94\,000 \, \Omega \quad (3.21)$$

$$R_{Q2} = \frac{R_{Q1} \cdot R_Q}{R_{Q1} - R_Q} = \frac{94\,000 \cdot 47\,000}{94\,000 - 47\,000} = 94\,000 \, \Omega \quad (3.22)$$

Výslednou hodnotou pro rezistor R_{Q1} a R_{Q2} z řady E24 bude **91 k Ω** .

V doporučení [4] je uveden vzorec (3.22) pro kontrolu kmitočtu, při kterém bude mít elektronický filtr nejvyšší napěťový a admitanční přenos.

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R_3}{C_1 C_2 R_1 R_2 R_4}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10\,000}{(3,3 \cdot 10^{-9})^2 \cdot 4\,700^2 \cdot 10\,000}} = 10\,261 \text{ Hz} \quad (3.22)$$

Kmitočet je mírně vyšší, což je zapříčiněno zaokrouhlením součástek do řad.

V Tabulce 15 je uveden výčet všech vypočtených součástí pro všechny činitelé jakosti.

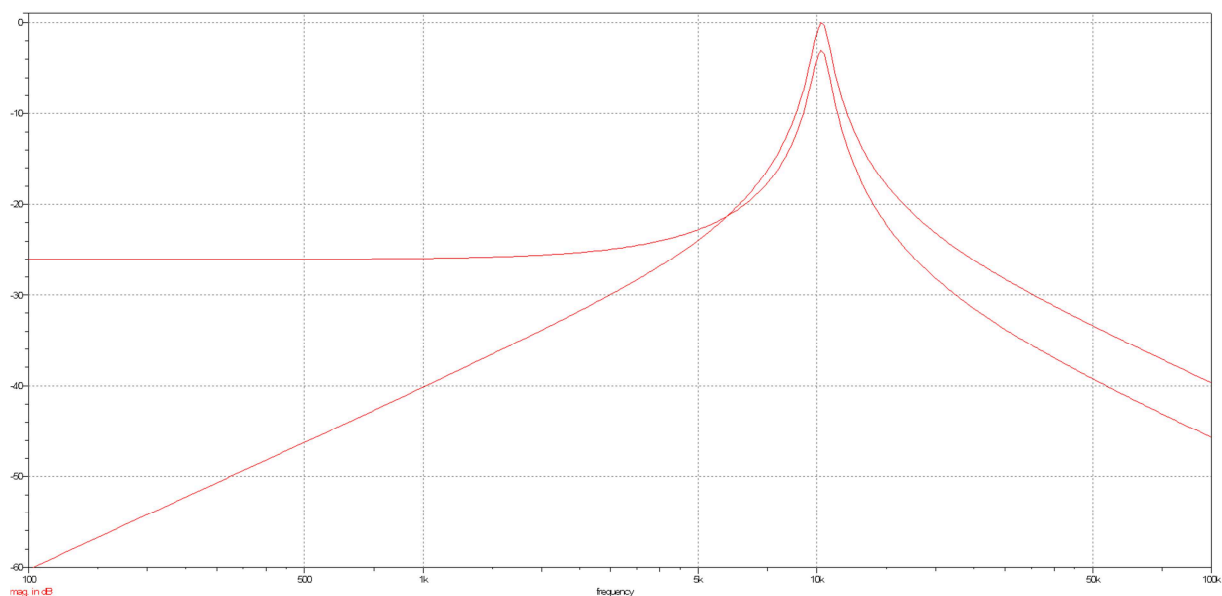
Tabulka 15 Seznam součástí pro PP 2.řádu pro všechna Q

	Q_1	Q_2	Q_5	Q_{10}
$R_{Q1} [\Omega]$	9 100	18 000	47 000	94 000
$R_{Q2} [\Omega]$	-	18 000	47 000	94 000
$R_1 [\Omega]$	4 700	4 700	4 700	4 700
$R_2 [\Omega]$	4 700	4 700	4 700	4 700
$R_3 [\Omega]$	10 000	10 000	10 000	10 000
$R_4 [\Omega]$	10 000	10 000	10 000	10 000
$C_1 [\text{nF}]$	3,3	3,3	3,3	3,3
$C_2 [\text{nF}]$	3,3	3,3	3,3	3,3

3.5.2 Simulace programem SNAP

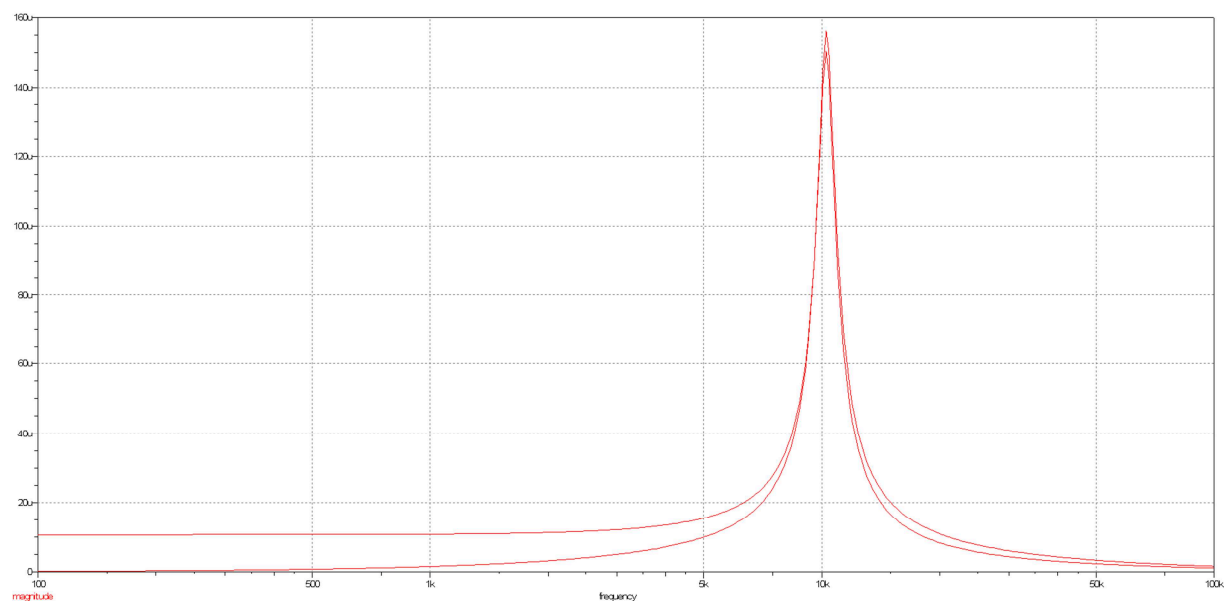
Postup práce s programem SNAP je již popsán v kapitole 3.1.2. Zde jsem postupoval úplně stejně. S tím rozdílem, že jsem použil schéma zapojení popsané na Obrázku 3.13.

Na Obrázku 3.14 je napěťový přenos, který je výstupem z programu SNAP. U tohoto filtru nedochází k zesílení vstupního signálu, což je žádoucí a pro nás velice výhodné, protože vstupní signál nebude tímto omezován. Nejvyššího přenosu je dosaženo při kmitočtu **10 250 Hz**, což nám koresponduje s výpočty.



Obrázek 3.14 Napěťový přenos PP 2.řádu pro $Q=10$

Na obrázku 3.15 je admitanční přenos, jehož nejvyšší hodnoty dosahují přibližně obě propusti. Hodnota **0,16 mS** při kmitočtu **10 250 Hz**.



Obrázek 3.15 Admitanční přenos PP 2.řádu pro $Q=10$

Souhrnný přehled přenosů pro všechny činitelé jakosti je uveden v Tabulce 16. Všechny ostatní obrázky napěťových a admitančních přenosů jsou umístěny v příloze na CD v dané složce k tomuto filtru.

Tabulka 16 Přehled napěťových a admitančních přenosů PP 2. řádu pro všechna Q

Napěťové přenosy	Q_1	Q_2	Q_5	Q_{10}
Pásmová propust [dB]	0	0	0	0
Dolní propust [dB]	-2,7	-2,9	-3	-3

Admitanční přenosy	Q_1	Q_2	Q_5	Q_{10}
Pásmová propust [S]	0,16	0,16	0,16	0,16
Dolní propust [S]	0,15	0,15	0,15	0,15

3.5.3 Aplikace kritérií určující velikost vstupního signálu

Kritérium č. 1

Pro aplikaci kritéria č. 1 (2.1) je nutné nejdříve přepočítat napět'ové přenosy z dB na bezrozměrnou jednotku jako poměr U_2 k U_1 za pomoci (2.2). Vezmeme tedy nejvyšší hodnotu napět'ového přenosu a dosadíme. Pro činitel jakosti $Q=10$ je hodnota zesílení rovná 0, tzn., že vstupní signál nebude tímto kritériem nijak omezen.

$$F_n(f) = 10^{\frac{Au[dB]}{20}} = 10^{\frac{0}{20}} = 1 [-]$$

$$U_{1max} = \frac{U_{2max}}{F_n(f)} = \frac{10}{1} = 10 \text{ V}$$

Kritérium č. 2

Dosadíme do vzorce (2.3) nejvyšší hodnotu z admitančního přenosu a vypočítáme.

$$I_2 = Y_t(f) * U_{1max} = 0,16 * 10^{-3} * 10 = 1,6 \text{ mA}$$

Tuto hodnotu zkontrolujeme s katalogovou hodnotou (Tabulka 2) a vidíme, že výstupní proud splňuje podmínku $\leq 25 \text{ mA}$. Tato hodnota je v pořádku.

Kritérium č. 3

Dosadíme do vzorce (2.4) kmitočet, při kterém je dosaženo nejvyššího napět'ového přenosu, a vypočítáme.

$$SR = 2\pi * F_n(f) * U_{2max} * 10^{-6} = 2\pi * 10261 * 10 * 10^{-6} = 0,64 \text{ V}/\mu\text{S}$$

Po překontrolování s katalogovou hodnotou (Tabulka 2) zjistíme, že tato hodnota překračuje katalogovou hodnotu a je jediným omezujícím parametrem, tomuto parametru musíme přizpůsobit velikost vstupního signálu. Znovu tedy dosadíme hodnoty do vzorce (2.4) s tím rozdílem, že výsledek musí vyjít $\leq 0,5 \text{ V}/\mu\text{S}$, čehož dosáhneme snížením hodnoty výstupního napětí na 7,7 V.

$$SR = 2\pi * F_n(f) * U_{2max} * 10^{-6} = 2\pi * 10261 * 7,7 * 10^{-6} = 0,49 \text{ V}/\mu\text{S}$$

Nyní je splněna katalogová hodnota, musíme zpětně znovu přepočítat **kritérium č. 1**.

$$U_{1max} = \frac{U_{2max}}{F_n(f)} = \frac{7,7}{1} = 7,7 \text{ V}$$

A na závěr ještě **kritérium č. 2**.

$$I_2 = Y_t(f) * U_{1max} = 0,16 * 10^{-3} * 7,7 = 1,23 \text{ mA}$$

Ted' máme konečně vypočítané všechny hodnoty. Pokud všechny tyto hodnoty dodržíme, filtr se bude chovat lineárně.

V Tabulce 17 jsou uvedeny finální hodnoty pro všechny činitele jakosti, které když dodržíme, tak se bude elektronický filtr chovat lineárně.

Tabulka 17 Parametry pro práci PP 2.řádu v lineární oblasti

	Q ₁	Q ₂	Q ₅	Q ₁₀
U _{1max} [V]	7,7	7,7	7,7	7,7
U _{2max} [V]	7,7	7,7	7,7	7,7
I _{2max} [mA]	1,23	1,23	1,23	1,23
SR [V/μS]	0,49	0,49	0,49	0,49

3.6 Porovnání filtrů

U všech zapojení elektronických filtrů s OZ jsme byli limitováni možnostmi operačního zesilovače (především rychlostí přeběhu), což pro reálná zapojení je nevhodné, avšak pro naši ukázkou nelineárních parametrů žádoucí.

Elektronický filtr popsán v Kapitole 3.5 je nejvýhodnější a to z několika důvodů. Dokumentace [4] je velice přesná, protože vypočítaný kmitočet, při kterém dochází k nejvyšším přenosům, je s minimální odchylkou stejný jako kmitočet simulovaný programem SNAP. Navíc tento kmitočet téměř koresponduje s požadovaným kmitočtem. Velikost vstupního napětí je největší za minimální hodnoty odebíraného proudu. Při použití rychlejšího operačního zesilovače by bylo možno přivést vstupní napětí shodné s maximálním výstupním napětím.

Druhým nejvhodnějším filtrem bych označil filtr popsán v Kapitole 3.3. Dokumentace [3] je přesná, avšak výsledný kmitočet, při kterém má filtr nejvyšší přenos je vyšší, což má za následek snížení maximálního vstupního napětí. Velikost vstupního napětí je však velice uspokojivá. Dokumentaci [3] tedy můžeme brát jako hrubý návrh filtru a vlastním doladěním filtru se dostaneme na stejné hodnoty jako u předchozího filtru. Oproti předchozímu filtru má tento výhodu, že nám poskytuje i horní propust.

Filtry popsané v Kapitolách 3.2 a 3.4 jsou téměř shodné, jejich vstupní napětí je však velice nízké, může za to velké zesílení propustí. Dokumentace filtru z Kapitoly 3.2 je dobrá, protože výsledný kmitočet, při kterém dochází k nejvyšším přenosům, je shodný s naměřeným kmitočtem, což o filtru z Kapitoly 3.4 říci nelze.

Jako nejhorší a nejnevhodnější elektronický filtr bych označil filtr z Kapitoly 3.1. Jehož dokumentace [2] je velice hrubá. Vypočtené kmitočty, při kterých dochází k nejvyšším přenosům, jsou velmi odlišné se simulací. Navíc dochází k velkému napětíovému zesílení, což má za následek výrazné zmenšení vstupního napětí.

4 Experimentální ověření

Experimentální zapojení probíhalo na nepájivém poli za použití reálných součástek. Rezistory s kondenzátory nenabývají přesných hodnot, které jsou uvedené na jejich těle. Což má za následek posunutí kmitočtu, při kterém dochází k nejvyšším napěťovým a admitančním přenosům. Díky použití reálného operačního zesilovače LM348N se navíc uplatňují tranzitní kmitočty, který ovlivňují rychlost přeběhu, tzn. při překročení maximální rychlosti přeběhu, nemusí ihned docházet ke zkreslení výstupního signálu.

Pro všechna zapojení probíhalo měření následovným způsobem. Po sestavení obvodu dle schématu ke každému elektronickému filtru jsem připojil generátor sinusového průběhu na vstup. Paralelně ke generátoru jsem připojil i 1. kanál osciloskopu pro kontrolu kmitočtu a průběhu signálu vstupujícího do obvodu. 2. kanál byl připojen vždy na výstup z daného operačního zesilovače, následně jsem odečetl a zapsal hodnotu do tabulky přečtenou z osciloskopu. Pro každé schéma jsem provedl několik měření. V první řadě jsem nastavil dle vypočtených součástek filtr na činitel jakosti 1, 5 a 10. Poté jsem na generátoru zvolil vstupní rozkmit signálu ± 100 mV, ± 1 V a ± 5 V. Pro každé ze vstupních napětí jsem volil kmitočet 50, 100, 500, 1 000, 5 000, 8 000, 9 000, 10 000, 11 000, 12 000, 50 000, 100 000, 500 000 a 1 000 000 Hz. Kolem našeho požadovaného kmitočtu (tj. 10 000 Hz) jsem volil jemnější krok. Měření bylo časově velice náročné, protože bylo třeba hodně nastavování. Výsledkem je však velké množství hodnot pro následné zhodnocení každého z filtrů.

V následujících kapitolách uvedu a zhodnotím průběhy jednotlivých filtrů pro činitel jakosti $Q=10$ a rozkmit vstupního signálu ± 5 V, zde budou totiž nejvíce názorné nelinearity. Grafy byly vyhotoveny v programu MS Office Excel 2010. Tečkovaně jsou zobrazeny přímo naměřené hodnoty. Pro věrohodnější průběhy jsem nechal jednotlivé grafy přepočítat. V tabulkách uvádím již přepočtené hodnoty v dB. Všechny ostatní průběhy jsou přiloženy v příloze na CD k danému filtru.

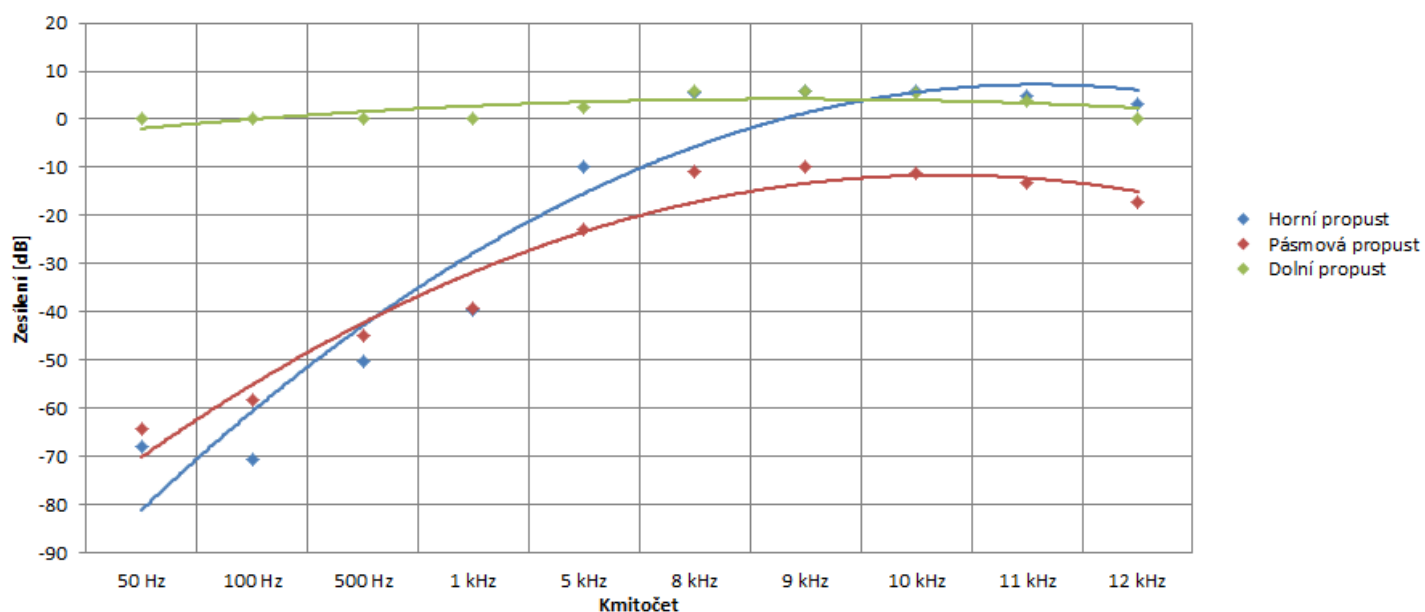
4.1 Bikvald TAB-KHN v základním neinvertujícím zapojení

Výsledné naměřené hodnoty v dB jsou uvedeny níže v Tabulce 18. Z této tabulky lze zkonstruovat graf, který nám názorně ukáže napěťový přenos jednotlivých propustí.

Tabulka 18 Naměřené hodnoty KHN neinvertující pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5\text{ V}$

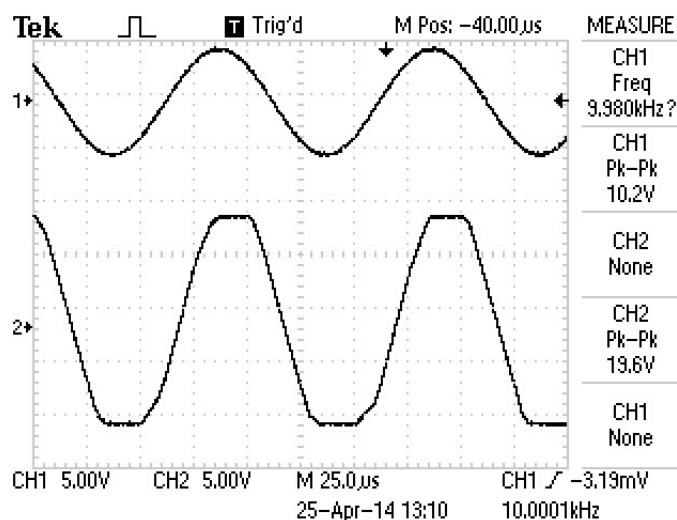
Q=10	U1 = ± 5 V		
	HP [dB]	PP [dB]	DP [dB]
50 Hz	-67,9588	-64,437	0
100 Hz	-70,4576	-58,4164	0
500 Hz	-50,1728	-44,8825	0
1 kHz	-39,6593	-39,1721	0
5 kHz	-10,0063	-22,8534	2,411479
8 kHz	5,390259	-10,8122	5,933304
9 kHz	5,933304	-9,897	5,845121
10 kHz	5,845121	-11,3086	5,575072
11 kHz	4,710569	-13,1515	3,973142
12 kHz	3,16725	-17,0774	0,172003
50 kHz	Neměřitelné		
100 kHz			
500 kHz			
1 MHz			

Napěťové přenosy pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5\text{ V}$



Obrázek 4.1 Napěťový přenos KHN neinvertující pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5\text{ V}$

Dle simulace z Kapitoly 3.1.2 mělo k nejvyššímu napět'ovému přenosu docházet při kmitočtu 11,5 kHz, u tohoto kmitočtu reálně docházelo k největšímu zkreslení. Díky zpětným vazbám ve filtru došlo k tak výrazným zkreslením, že měření nebylo dále proveditelné. Na Obrázku 4.2 vidíme výstup Horní propusti z osciloskopu při kmitočtu 10 kHz a omezený signál na maximální hodnotě U_{2max} . Můžeme si také povšimnout, že výstupní signál je ve fázi se signálem vstupním. Výstupní omezený signál vypadá totožně, jak je již popsáno v Kapitole 2.2.



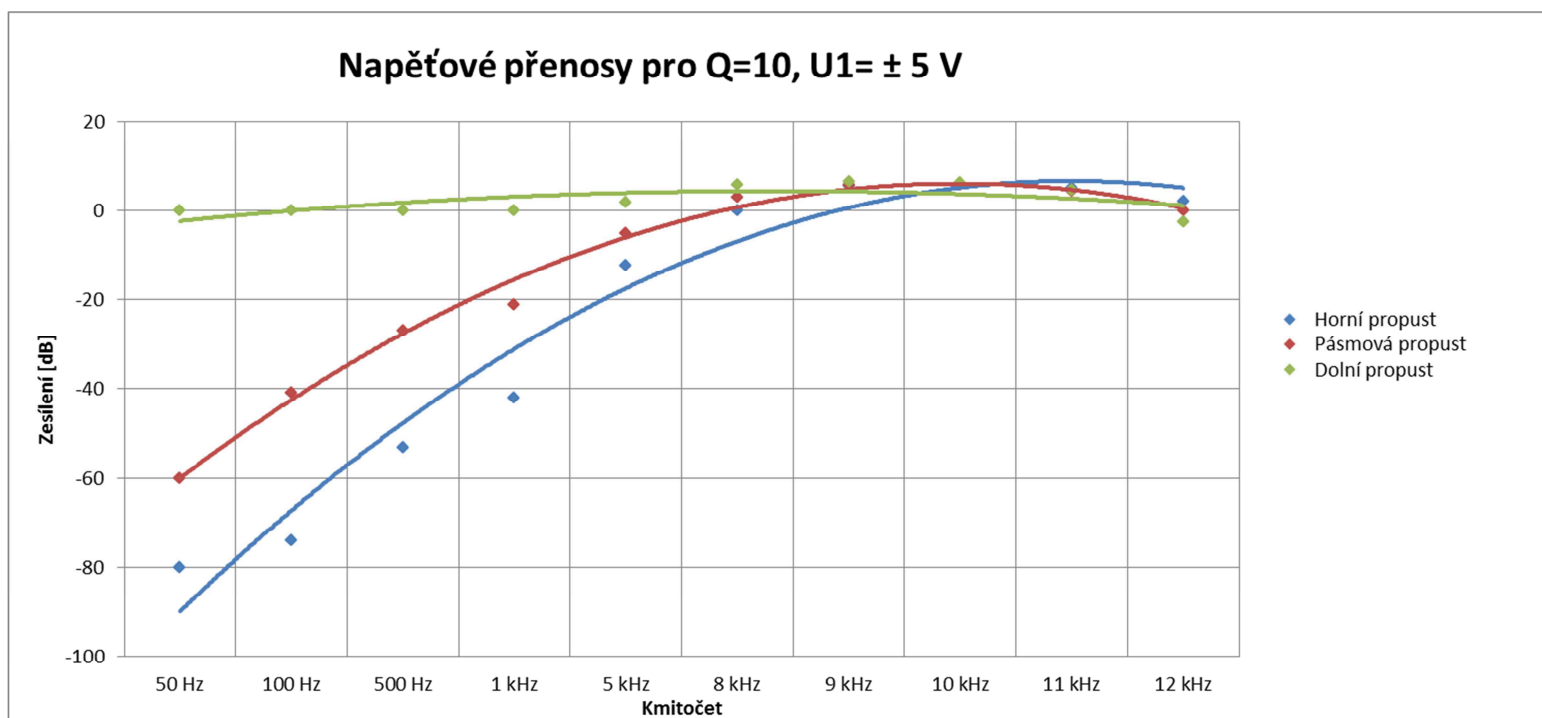
Obrázek 4.2 Omezení KHN neinvertující velkým vstupním signálem

4.2 TAB-KHN v základním invertujícím zapojení

Výsledné naměřené hodnoty v dB jsou uvedeny níže v Tabulce 19. Z této tabulky lze zkonstruovat graf, který nám názorně ukáže napěťový přenos jednotlivých propustí.

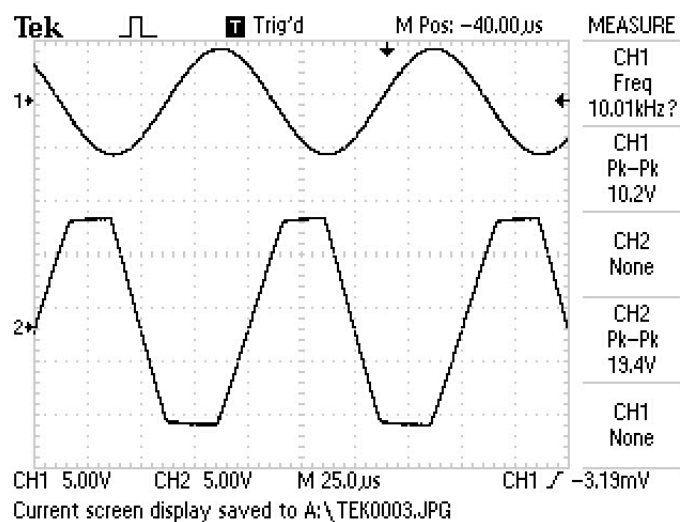
Tabulka 19 Naměřené hodnoty KHN invertující pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5$ V

Q=10	U ₁ = ± 5 V		
	HP [dB]	PP [dB]	DP [dB]
50 Hz	-80	-60	0
100 Hz	-73,9794	-40,9151	-0,06977
500 Hz	-53,1515	-26,9551	0
1 kHz	-41,9382	-21,1103	0
5 kHz	-12,3958	-5,03624	1,868434
8 kHz	0	3,045767	5,756035
9 kHz	5,666025	5,756035	6,444386
10 kHz	5,756035	5,756035	6,277344
11 kHz	5,10545	4,454329	4,608978
12 kHz	2,076074	0	-2,61537
50 kHz	Neměřitelné		
100 kHz			
500 kHz			
1 MHz			



Obrázek 4.3 Napěťový přenos KHN neinvertující pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5$ V

Z Tabulky 19 a Obrázku 4.3 pozorujeme, že tento filtr se chová úplně stejně jako předchozí filtr z Kapitoly 4.1. Tato skutečnost byla očekávána, protože se jedná o stejná zapojení. Jedinou výraznou změnou je, že výstupní signál není ve fázi se signálem vstupním, což je patrné i z Obrázku 4.4 (Pásmová propust).



Obrázek 4.4 Omezení KHN invertující velkým vstupním signálem

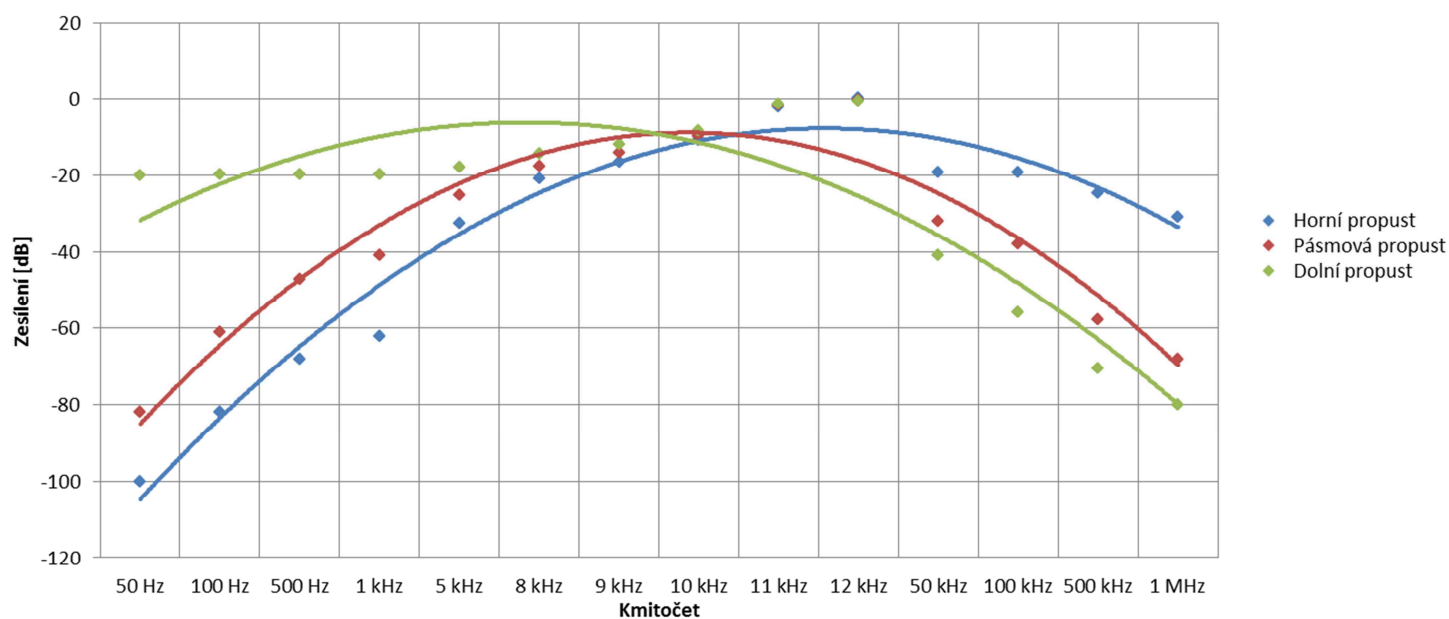
4.3 TAB-KHN v modifikovaném neinvertujícím zapojení

Výsledné naměřené hodnoty v dB jsou uvedeny níže v Tabulce 20. Z této tabulky lze zkonstruovat graf, který nám názorně ukáže napěťový přenos jednotlivých propustí.

Tabulka 20 Naměřené hodnoty KHN modifikovaný pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5$ V

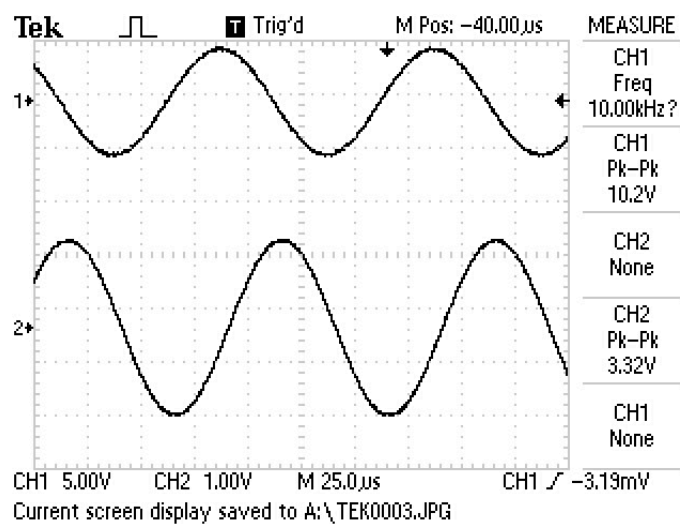
Q=10	U1 = ± 5 V		
	HP [dB]	PP [dB]	DP [dB]
50 Hz	-100	-81,9382	-20,0698
100 Hz	-81,9382	-60,9151	-19,828
500 Hz	-67,9588	-47,1309	-19,828
1 kHz	-61,9382	-40,8192	-19,6593
5 kHz	-32,3958	-25,288	-17,8558
8 kHz	-20,8001	-17,4579	-14,244
9 kHz	-16,3631	-14,1549	-11,972
10 kHz	-10,8122	-9,57724	-8,31338
11 kHz	-2,11368	-1,68146	-1,26973
12 kHz	0,256744	-0,06977	-0,35458
50 kHz	-19,1721	-32,0412	-40,9151
100 kHz	-19,3315	-37,8558	-55,9176
500 kHz	-24,6717	-57,7211	-70,4576
1 MHz	-30,8122	-67,9588	-80

Napěťové přenosy pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5$ V



Obrázek 4.5 Napěťový přenos KHN modifikovaný pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5$ V

Z Tabulky 20 a Obrázku 4.5 vidíme, že nedochází k žádnému zkreslení výstupního signálu, protože nebylo překročeno maximální vstupní napětí. Zkreslení výstupního signálu by se projevilo až při překročení vstupního napětí $> 7,5 \text{ V}$. Měření proběhlo bez problému pro všechny kmitočty. Na Obrázku 4.6 je nezkreslený výstupní signál Pásmové propusti při kmitočtu 10 kHz. Výstupní signál je jen mírně zpožděn vůči signálu vstupnímu.



Obrázek 4.6 Nezkreslený výstupní signál KHN modifikovaný

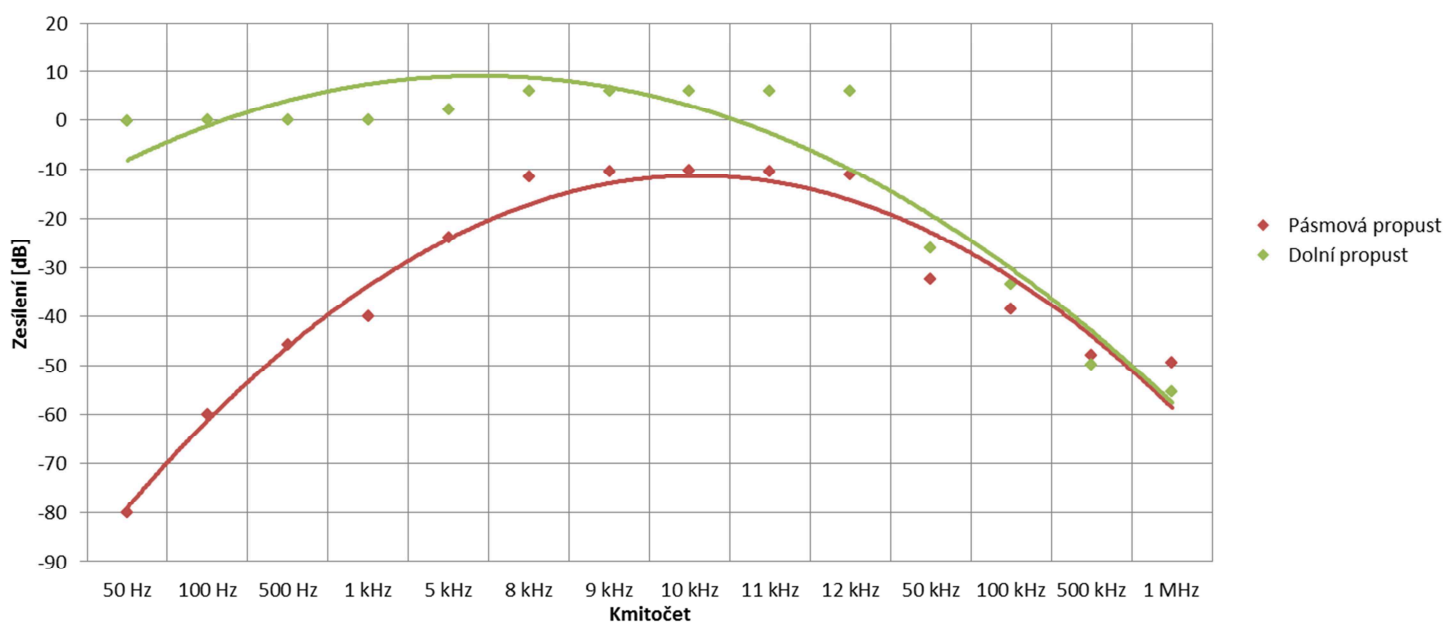
4.4 TAB-TT v základním invertujícím zapojení

Výsledné naměřené hodnoty v dB jsou uvedeny níže v Tabulce 21. Z této tabulky lze zkonstruovat graf, který nám názorně ukáže napěťový přenos jednotlivých propustí.

Tabulka 21 Naměřené hodnoty TT invertující pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5\text{ V}$

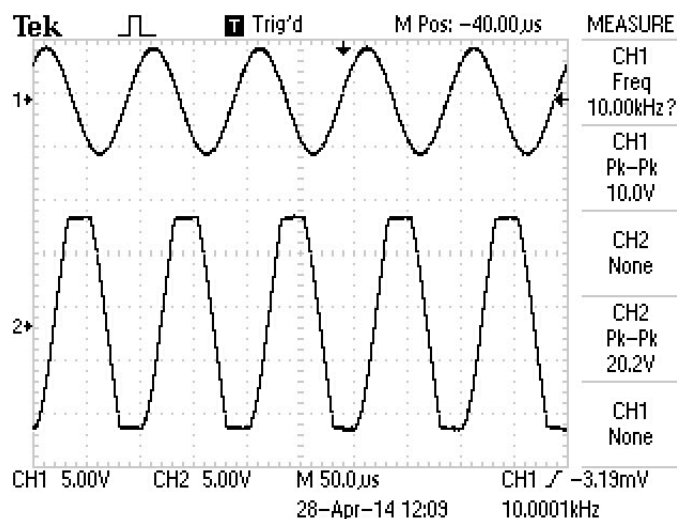
Q=10	U1 = $\pm 5\text{ V}$	
	PP [dB]	DP [dB]
50 Hz	-80	-0,1401
100 Hz	-60	0
500 Hz	-45,8486	0
1 kHz	-40	0
5 kHz	-23,8764	2,144199
8 kHz	-11,4373	6,0206
9 kHz	-10,3425	6,0206
10 kHz	-10,1169	6,0206
11 kHz	-10,4576	6,0206
12 kHz	-11,0568	6,0206
50 kHz	-32,3958	-26,0206
100 kHz	-38,5624	-33,3109
500 kHz	-47,9588	-49,897
1 MHz	-49,3704	-55,391

Napěťové přenosy pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5\text{ V}$



Obrázek 4.7 Napěťový přenos TT invertující pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5\text{ V}$

K nejvyššímu napětovému přenosu mělo dle simulace z Kapitoly 3.4.2 docházet při kmitočtu 10 250 HZ, což jsem nemohl ověřit, protože signál byl v rozmezí 8 – 12 kHz omezen na maximální hodnotě výstupního napětí. U Dolní propusti dochází k výraznému zkreslení, jež je patrné na Obrázku 4.8. Na Pásmovou propust to mělo negativní dopad, protože signál nedosáhl zesílení 0 dB, ale zůstal po celou dobu zaseknutý na hodnotě kolem -10 dB. Signál pásmové propusti nebyl nijak výrazně zkreslen. Zkreslení také nemělo vliv na měření pro ostatní kmitočty, proto měření proběhlo úspěšně až do konce.



Obrázek 4.8 Omezení TT velkým vstupním signálem

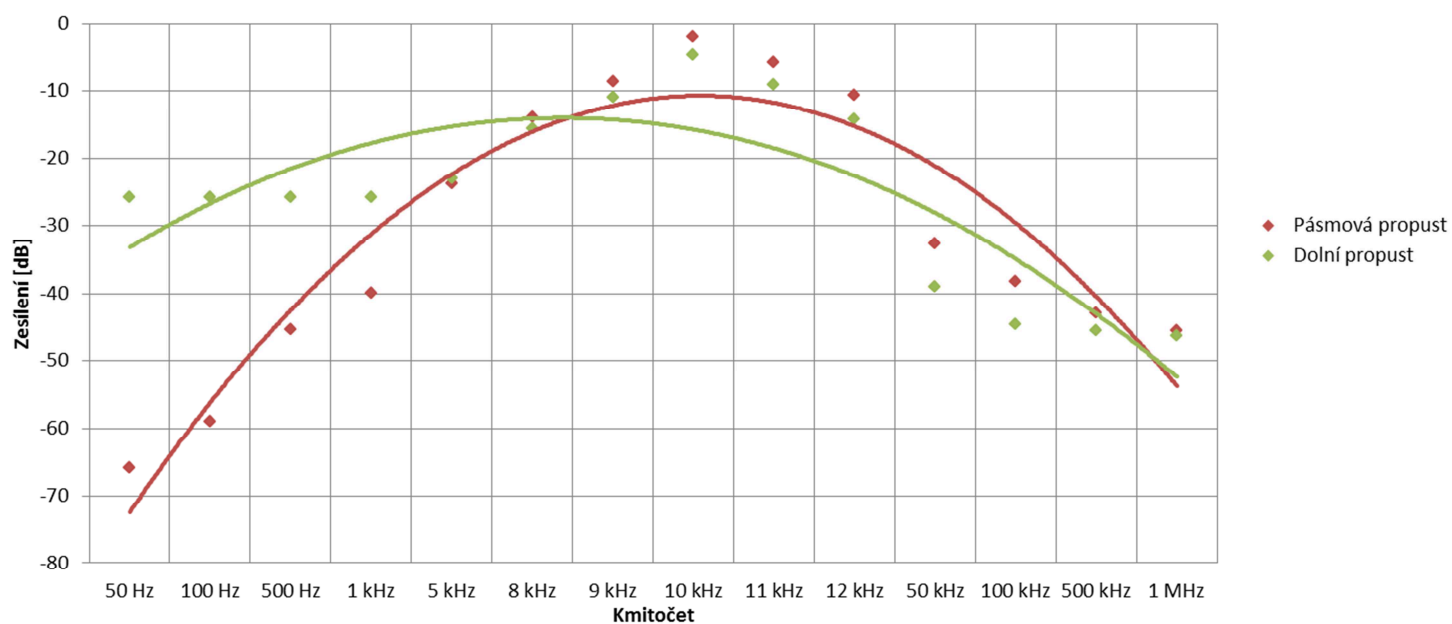
4.5 Pásmová propust 2. řádu se 2 operačními zesilovači

Výsledné naměřené hodnoty v dB jsou uvedeny níže v Tabulce 22. Z této tabulky lze zkonstruovat graf, který nám názorně ukáže napěťový přenos jednotlivých propustí.

Tabulka 22 Naměřené hodnoty PP 2. řádu pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5\text{ V}$

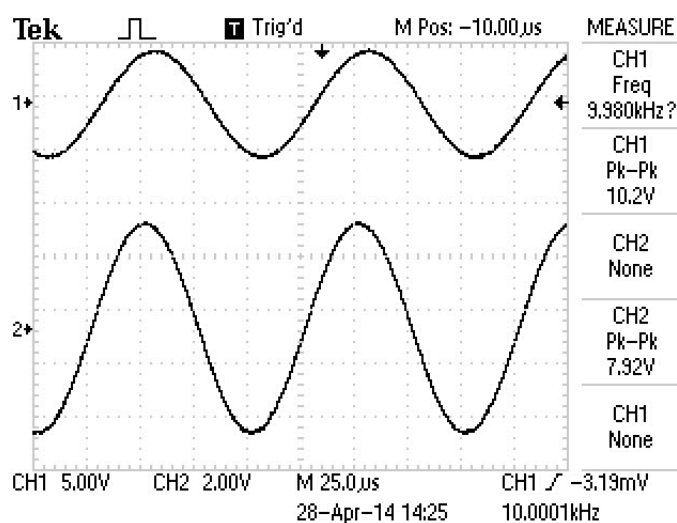
Q=10	U1 = $\pm 5\text{ V}$	
	PP [dB]	DP [dB]
50 Hz	-66,0206	-26,0206
100 Hz	-59,1721	-26,0206
500 Hz	-45,5145	-26,0206
1 kHz	-40	-26,0206
5 kHz	-23,8764	-23,098
8 kHz	-13,9794	-15,7031
9 kHz	-8,68304	-11,0568
10 kHz	-2,0255	-4,91303
11 kHz	-5,95139	-9,26883
12 kHz	-10,8122	-14,334
50 kHz	-32,7654	-39,1721
100 kHz	-38,4164	-44,7314
500 kHz	-42,9748	-45,6799
1 MHz	-45,6799	-46,3752

Napěťové přenosy pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5\text{ V}$



Obrázek 4.9 Napěťový přenos PP 2. řádu pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5\text{ V}$

Z Tabulky 22 a Obrázku 4.5 vidíme, že nedochází k žádnému zkreslení výstupního signálu, protože nebylo překročeno maximální vstupní napětí. K tomu zkreslení by docházelo při překročení maximálního vstupní napětí tj. $> 7,7 \text{ V}$. Graf na Obrázku 4.9 nám také prozrazuje, že k nejvyššímu napěťovému přenosu dochází při kmitočtu 10 kHz , což souhlasí se simulací popsanou v Kapitole 3.5.2. Dále si můžeme povšimnout, že napěťový přenos Dolní propusti měl být dle simulace přibližně o 3 dB nižší. V praktickém zapojení se toto také projevilo. Měření proběhlo bez problému pro všechny kmitočty. Na Obrázku 4.6 je nezkrácený výstupní signál Pásmové propusti při kmitočtu 10 kHz .



Obrázek 4.10 Nezkrácený výstupní signál PP 2. řádu

5 Závěr

Na začátku této práce jsem vypracoval důležitá kritéria, která nám omezují rozkmit vstupního signálu. Tato kritéria byla aplikována na 5 běžně dostupných a používaných elektronických filtrů.

Výsledky všech praktických měření jsou shodné se simulovanými hodnotami. Funkční návrhy filtrů jsou tedy správné. Pro další měření bych mohl volit jiné součástky pro přesné nastavení do námi definovaných požadavků a dále proměřit i jiné filtry. Prakticky jsem ověřil dopad na filtr po překročení maximálního vstupního napětí. Toto překročení se projevovalo rychlostí přeběhu, kdy operační zesilovač nestíhal kopírovat vstupní signál a omezením signálu na maximální hodnotě výstupního napětí. Tímto měřením jsem si potvrdil, že teoretické statické a dynamické nelineární parametry jsou shodné s praktickými. Jak bylo předpokládáno, u všech měření jsme byli nejvíce limitováni rychlostí přeběhu operačního zesilovače. Pro takto vysoko zvolený kmitočet je operační zesilovač LM348N nevhodný, pro názornou ukázkou nelinearit byl však postačující.

Pro použití v praxi je nejvhodnější filtr popsán v kapitole 3.5, jehož dokumentace odpovídá simulaci i experimentálnímu zapojení. Návrh tohoto filtru je velice jednoduchý a přesný. Za použití rychlejšího operačního zesilovače nebude problém přivést vstupní napětí shodné s maximálním výstupním napětím. Žádná z propustí nedosahuje kladného zesílení výstupního signálu, proto zde kritérium č. 1 neplatí.

Filtr, který jsem popsal v Kapitole 3.3 je pro použití v praxi také velice vhodný. Dokumentace není ovšem tak přesná, ovšem jemným doladěním součástek dosáhneme stejných hodnot jako u předchozího filtru. Velkou výhodou tohoto filtru navíc je přítomnost Horní propusti.

Ostatní filtry popsané v této práci jsou pro praktická zapojení jako filtry nevhodné. Alespoň jedna z jejich propustí dosahuje 10násobného zesílení vstupního signálu. Toto zesílení následně díky zpětným vazbám omezuje i pásmovou propust. Tyto obvody jsou vhodné pro použití jako zesilovače.

Seznam použité literatury

- [1] DOSTÁL, Jiří. *Operační zesilovače*. Praha: BEN, 2005, 1. Vydání, str. 536. ISBN 80-7300-049-0.
- [2] DOSTÁL, Tomáš. *Elektrické filtry*. Skripta VUT-Brno, 2007.
- [3] FRANCO, Sergio. *Design with operational amplifiers and analog integrated circuits*. New York: McGraw-Hill, 2002, 3.rd edition, pg. 658. ISBN 0-07-112173-0.
- [4] HÁJEK, Karel a SEDLÁČEK, Jiří. *Kmitočtové filtry*. Praha: BEN, 2002, 1. Vydání, str. 536. ISBN 80-7300-023-7.
- [5] TESAŘ, Zdeněk. *Faktory ovlivňující dynamický vstupní rozsah vstupních signálů elektronických filtrů*. Časopis EE, VOL X. NO X/S, 2010, 1-4

Seznam obrázků

Obrázek 2.1 Schématická značka operačního zesilovače.....	10
Obrázek 2.2 Omezení velkým vstupním signálem.....	11
Obrázek 2.3 Omezení velkým výstupním proudem.....	11
Obrázek 2.4 Omezení rychlostí přeběhu.....	12
Obrázek 3.1 Schéma zapojení KHN neinvertující pro $Q=10$	15
Obrázek 3.2 Napěťový přenos KHN neinvertující pro $Q=10$	17
Obrázek 3.3 Admitanční přenos KHN neinvertující pro $Q=10$	18
Obrázek 3.4 Schéma zapojení KHN invertující pro $Q=10$	21
Obrázek 3.5 Napěťový přenos KHN invertující pro $Q=10$	23
Obrázek 3.6 Admitanční přenos KHN invertující pro $Q=10$	24
Obrázek 3.7 Schéma zapojení KHN modifikovaný neinvertující pro $Q=10$	27
Obrázek 3.8 Napěťový přenos KHN modifikovaný pro $Q=10$	28
Obrázek 3.9 Admitanční přenos pro KHN modifikovaný pro $Q=10$	29
Obrázek 3.10 Schéma zapojení TT invertující pro $Q=10$	32
Obrázek 3.11 Napěťový přenos TT invertující pro $Q=10$	33
Obrázek 3.12 Admitanční přenos TT invertující pro $Q=10$	34
Obrázek 3.13 Schéma zapojení Pásmová propust 2. Řádu pro $Q=10$	37
Obrázek 3.14 Napěťový přenos PP 2.řádu pro $Q=10$	38
Obrázek 3.15 Admitanční přenos PP 2.řádu pro $Q=10$	39
Obrázek 4.1 Napěťový přenos KHN neinvertující pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5\text{ V}$	44
Obrázek 4.2 Omezení KHN neinvertující velkým vstupním signálem.....	45
Obrázek 4.3 Napěťový přenos KHN neinvertující pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5\text{ V}$	46
Obrázek 4.4 Omezení KHN invertující velkým vstupním signálem.....	47
Obrázek 4.5 Napěťový přenos KHN modifikovaný pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5\text{ V}$	48
Obrázek 4.6 Nezkreslený výstupní signál KHN modifikovaný.....	49
Obrázek 4.7 Napěťový přenos TT invertující pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5\text{ V}$	50
Obrázek 4.8 Omezení TT velkým vstupním signálem.....	51
Obrázek 4.9 Napěťový přenos PP 2. řádu pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5\text{ V}$	52
Obrázek 4.10 Nezkreslený výstupní signál PP 2. řádu.....	53

Seznam tabulek

Tabulka 1 Srovnání ideálního a reálného OZ.....	10
Tabulka 2 Požadované vlastnosti	14
Tabulka 3 Seznam součástek KHN neinvertující pro všechna Q.....	16
Tabulka 4 Přehled napěťových a admitančních přenosů KHN neinvertující pro všechny Q.....	18
Tabulka 5 Parametry pro práci KHN neinvertující v lineární oblasti.....	20
Tabulka 6 Seznam součástek KHN invertující pro všechna Q.....	23
Tabulka 7 Přehled napěťových a admitančních přenosů KHN invertující pro všechna Q.....	24
Tabulka 8 Parametry pro práci KHN invertující v lineární oblasti	26
Tabulka 9 Seznam součástek KHN modifikovaný pro všechna Q.....	28
Tabulka 10 Přehled napěťových a admitančních přenosů KHN modifikovaný pro všechna Q.....	29
Tabulka 11 Parametry pro práci KHN modifikovaný v lineární oblasti	31
Tabulka 12 Seznam součástek TT invertující pro všechna Q	33
Tabulka 13 Přehled napěťových a admitančních přenosů TT invertující pro všechna Q.....	34
Tabulka 14 Parametry pro práci TT invertující v lineární oblasti	36
Tabulka 15 Seznam součástek pro PP 2.řádu pro všechna Q.....	38
Tabulka 16 Přehled napěťových a admitančních přenosů PP 2. řádu pro všechna Q	39
Tabulka 17 Parametry pro práci PP 2.řádu v lineární oblasti.....	41
Tabulka 18 Naměřené hodnoty KHN neinvertující pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5$ V	44
Tabulka 19 Naměřené hodnoty KHN invertující pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5$ V.....	46
Tabulka 20 Naměřené hodnoty KHN modifikovaný pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5$ V.....	48
Tabulka 21 Naměřené hodnoty TT invertující pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5$ V.....	50
Tabulka 22 Naměřené hodnoty PP 2. řádu pro $Q=10$, $U_1 = \pm 5$ V	52

Seznam příloh

Součástí Bakalářské práce je CD.

Adresářová struktura přiloženého CD je následující:

\\BP_KOZ0081\

01. KHN neinvertující\

- přiložené napěťové a admitanční průběhy ze simulace a experimentálního zapojení rozděleny pro jednotlivé činitelé jakosti

02. KHN invertující\

- přiložené napěťové a admitanční průběhy ze simulace a experimentálního zapojení rozděleny pro jednotlivé činitelé jakosti

03. KHN modifikované zapojení\

- přiložené napěťové a admitanční průběhy ze simulace a experimentálního zapojení rozděleny pro jednotlivé činitelé jakosti

04. TT invertující\

- přiložené napěťové a admitanční průběhy ze simulace a experimentálního zapojení rozděleny pro jednotlivé činitelé jakosti

05. PP 2. řádu\

- přiložené napěťové a admitanční průběhy ze simulace a experimentálního zapojení rozděleny pro jednotlivé činitelé jakosti